

**METODOLOGÍAS PRÁCTICAS PARA DISMINUIR  
LAS DETENCIONES NO PROGRAMADAS  
DE EQUIPOS MOTOCOMPRESORES**



**ZUÑIGA, Marcos Julián**

**PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL**

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del  
Comahue como requisito para la obtención del grado de  
**INGENIERO MECÁNICO**

Neuquén - Argentina

2021

**METODOLOGÍAS PRÁCTICAS PARA DISMINUIR  
LAS DETENCIONES NO PROGRAMADAS  
DE EQUIPOS MOTOCOMPRESORES**

**ZUÑIGA, Marcos Julián**

Director: Ing. **CAMPOS, Damián**

Co-director: Ing. **DONDI, Fernando**

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del  
Comahue como requisito para la obtención del título de grado de  
**INGENIERO MECÁNICO**

Neuquén - Argentina

2021

# **METODOLOGÍAS PRÁCTICAS PARA DISMINUIR LAS DETENCIONES NO PROGRAMADAS DE EQUIPOS MOTOCOMPRESORES**

**ZUÑIGA, Marcos Julián**

Aprobado en fecha 01 de Diciembre de 2021

Tribunal evaluador:

- Mg. Ing. KEIL, Germán
- Ing. TROFFÉ, Mario
- Ing. RAMOSKA, Leandro Ariel

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres, por apoyarme todos los días y propiciar mi educación universitaria.

A todas las personas, que formaron parte de mi vida académica y personal durante todos estos años de Facultad.

A mi familia cercana, mis amigos, mis compañeros y mi novia que hicieron de mi recorrido algo más sencillo con sus consejos, ánimos, charlas y risas constituyéndose en un gran sustento.

A todos los docentes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue, que con su trabajo colaboraron con mi formación profesional.

A todos mis compañeros de trabajo que durante la pasantía me enseñaron y guiaron con una enorme predisposición.

# **METODOLOGÍAS PRÁCTICAS PARA DISMINUIR LAS DETENCIONES NO PROGRAMADAS DE EQUIPOS MOTOCOMPRESORES**

Autor: ZUÑIGA, Marcos Julián

Director: CAMPOS, Damián

Co-Director: DONDI, Fernando

## **Resumen**

Este trabajo tiene como objetivo la identificación de las principales fallas que afectan y reducen la disponibilidad de los motocompresores de una planta compresora de gas. Las actividades se desarrollaron en el marco del sistema de pasantías rentadas, para estudiantes de la carrera Ingeniería Mecánica, en una empresa argentina especializada en la exploración y producción de petróleo y gas.

La metodología propuesta se compone de cinco etapas principales, las cuales se aplican siguiendo un enfoque centrado en la confiabilidad de los componentes. En forma complementaria, el modelo presentado proporciona herramientas de apoyo para el desarrollo e implementación de las etapas, las cuales se aplican para analizar las detenciones no programadas asociadas al desvío de temperatura del cilindro motor y a las fallas de las válvulas del compresor.

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos y consideraciones generales al momento de proponer acciones tendientes a mejorar los índices de confiabilidad de los equipos motocompresores en concordancia con los objetivos de la organización.

*Palabras clave: motocompresores, mantenimiento, confiabilidad.*

# **PRACTICAL METHODOLOGIES TO REDUCE UNSCHEDULED DETENTIONS OF MOTORCOMPRESSOR EQUIPMENT**

Author: ZUÑIGA, Marcos Julián

Advisor: CAMPOS, Damián

Co-Advisor: DONDI, Fernando

## **Summary**

This work aims to identify the main failures that affect and reduce the availability of motor compressors in a gas compression plant. The activities were developed within the framework of the rented internship system, for students of the Mechanical Engineering career, in an Argentine company specialized in oil and gas exploration and production.

The proposed methodology is made up of five main stages, which are applied following an approach focused on the reliability of the components. In a complementary way, the presented model provides support tools for implementation of the stages, which are applied and developed to analyze the unscheduled stops associated with the temperature deviation of the engine cylinder and the failures of the compressor valves.

Finally, the results obtained and general considerations are presented when proposing actions to improve the reliability indices of motor-compressor equipment in concordance with the organization's objectives.

*Keywords: motor compressors, maintenance, reliability.*

---

## Índice

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Definición del problema . . . . .	2
1.2. Justificación . . . . .	3
<b>2. OBJETIVO</b>	<b>4</b>
<b>3. MARCO TEÓRICO</b>	<b>4</b>
3.1. Descripción del proceso . . . . .	4
3.2. Sistema de Compresión . . . . .	8
3.2.1. Motor . . . . .	9
3.2.2. Compresor Alternativo . . . . .	17
3.3. Metodología propuesta . . . . .	18
3.3.1. Obtención de datos-Sistema de información . . . . .	20
3.3.2. Preparación de datos . . . . .	20
3.3.3. Análisis de falla . . . . .	21
3.3.4. Análisis de datos de vida . . . . .	23
3.3.5. Acciones de mejora . . . . .	42
<b>4. DESARROLLO</b>	<b>43</b>
4.1. Análisis de Falla . . . . .	43
4.2. Análisis de Datos de Vida (LDA) . . . . .	50
4.3. Acciones de mejora . . . . .	58
4.4. Líneas futuras de trabajo . . . . .	69
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>70</b>
<b>6. REFERENCIAS</b>	<b>71</b>
<b>A. Anexo I: Diagrama de flujo planta compresora</b>	<b>73</b>
<b>B. Anexo II: Análisis Causa Raíz</b>	<b>75</b>
<b>C. Anexo III: Tratamiento detenciones no programadas</b>	<b>77</b>

---

## Índice de Figuras

1.	Vista general de la Planta. . . . .	4
2.	Equipo motocompresor. . . . .	5
3.	Motor Waukesha L-7044 GSI (GECó, 2017). . . . .	9
4.	Sistema turbocompresor (GECó, 2017). . . . .	10
5.	Esquema de la distribución de las termocuplas de escape (GECó, 2017). . . . .	11
6.	Sistema de distribución (GECó, 2017). . . . .	12
7.	Sistema de encendido-Componentes (GECó, 2017). . . . .	14
8.	Sistema de alimentación de combustible (Bugna, 2020) . . . . .	15
9.	Esquema del ESM (GECó, 2017). . . . .	17
10.	Compresor alternativo Ariel ( <a href="http://exploreariel.com">http://exploreariel.com</a> ). . . . .	17
11.	Componentes críticos del compresor ( <a href="http://exploreariel.com">http://exploreariel.com</a> ). . . . .	18
12.	Metodología propuesta. . . . .	19
13.	Curvas de Davies (Mora, 2009). . . . .	26
14.	Curva de confiabilidad (Moreno y col., 2017). . . . .	31
15.	Curva PDF (Mora, 2009). . . . .	32
16.	Curva de tasa de falla (Mora, 2009). . . . .	32
17.	Curva de media, mediana y moda ( <a href="https://www.reliawiki.com/">https://www.reliawiki.com/</a> ). . . . .	33
18.	Formas de los límites de confiabilidad ( <a href="https://www.reliawiki.com/">https://www.reliawiki.com/</a> ). . . . .	34
19.	Metodología de Beta binomial ( <a href="https://www.reliawiki.com/">https://www.reliawiki.com/</a> ) . . . . .	35
20.	Intervalo óptimo de sustitución preventiva ( <a href="https://www.reliawiki.com/">https://www.reliawiki.com/</a> ). . . . .	42
21.	Diagrama de Pareto de detenciones registradas durante el año 2019. . . . .	43
22.	Diagrama de Ishikawa para un número importante de detenciones no programadas por desvío de temperatura del cilindro motor. . . . .	47
23.	Diagrama de Ishikawa para un número importante de roturas de válvulas. . . . .	47
24.	Función de densidad de probabilidad para las bujías de ignición. . . . .	53
25.	Tasa de falla para las bujías de ignición. . . . .	54
26.	Función de confiabilidad para las bujías de ignición. . . . .	54
27.	Función de densidad de probabilidad para ambas válvulas de compresor . . . . .	55
28.	Tasa de falla para ambas válvulas de compresor . . . . .	55

---

29.	Función de confiabilidad para ambas válvulas de compresor . . . . .	56
30.	Tiempo óptimo para mantenimiento preventivo . . . . .	57
31.	Comparación entre bujías estándar vs Bosch 7305 en MC-Nº4 . . . . .	61
32.	Partículas sólidas encontradas en el interior de los cilindros del compresor.	64
33.	Diagrama de Pareto de reemplazo de válvulas. . . . .	64
34.	Recipiente de succión primera etapa (Planos del fabricante-Enerflex) . . .	65
35.	Pocket de volumen muerto (Ariel, 2011) . . . . .	66
36.	Estadísticas de reemplazo de válvulas de compresor . . . . .	68

---

---

## Índice de Tablas

1.	Ficha técnica del Motocompresor . . . . .	8
2.	Pareto de detenciones 2019 . . . . .	44
3.	Criterios para evaluar las causas y soluciones de detenciones no programadas por desvío de temperatura motor. . . . .	49
4.	Criterios para evaluar las causas y soluciones para la falla de válvulas de compresor. . . . .	49
5.	Parámetros para las bujías motor. . . . .	53
6.	Parámetros para las válvulas del compresor. . . . .	55
7.	Costos materiales de las intervenciones y reemplazos de válvulas ocasionados por sales en el gas. . . . .	67

---

## 1. INTRODUCCIÓN

Inicialmente, el mantenimiento surgió con la necesidad de solucionar fallas y paradas imprevistas de los distintos equipos para todas las aplicaciones. Siendo así su principal función la de “sostener la funcionalidad y el cuerpo de un objeto o aparato productivo para que cumpla su función de producir bienes o servicios” (Mora, 2009). Este se limitó a la intervención de manera correctiva, privilegiando las acciones de emergencia por sobre la planificación y el estudio de los comportamientos históricos de los equipos. Luego, se tendió al desarrollo de la mantención preventiva, la cual se aplica en fechas puntuales y constantes, para el reemplazo de componentes desgastados. Continuó el mantenimiento predictivo, el cual permite proyectar el comportamiento futuro de la instalación mediante el seguimiento de diversas variables funcionales.

Como último paso de su progreso, surge el mantenimiento mejorativo, que emplea modelos y metodologías orientados en la mejora de las instalaciones y equipos, como modo de garantizar a largo plazo la minimización de los costos productivos globales. Entre ellos se encuentran: el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), el Análisis de Ciclo de Vida (LCC) y la Mejora Continua (MC) (Moubray, 1997)(Vishnu y Regikumar, 2016).

En la actualidad el mantenimiento industrial forma parte esencial en los procesos productivos, dado que tiende a minimizar u optimizar el desarrollo en cuestión. En este sentido, se deben disminuir las fallas y averías en los sistemas involucrados con el mantenimiento y propiamente en la producción, que se refleja en costos e ingresos para la industria, por lo cual resulta indispensable la gestión de mantenimiento con base en los procesos industriales (González Sosa y col., 2018).

Dentro de las organizaciones, la Ingeniería de Mantenimiento asume un rol fundamental, ya sea en la etapa de concepción y desarrollo de los nuevos proyectos, como en el acompañamiento durante la operación de los mismos. En pocas palabras, esta es la actividad que dinamiza el proceso de mejora continua de la función de mantenimiento a través de la incorporación de conocimiento e inteligencia, y del análisis cualitativo que permita dar respaldo riguroso a las decisiones en el área de mantenimiento orientadas a favorecer el resultado operacional (Arata y Kristjanpoller, 2013).

En este contexto, es el ingeniero de mantenimiento quien tiene el desafío de proyectar

---

y proponer las políticas y técnicas de mantenimiento más adecuadas al sistema productivo, liderar la mejora continua del proceso, y monitorear y controlar las actividades de mantenimiento.

La explotación de hidrocarburos representa una de las actividades económicas con mayor influencia en la provincia de Neuquén. El proceso de producción de gas natural y petróleo desarrollado en las cuencas neuquinas, requiere una gran inversión en plantas, equipos, personal y logística, por lo que para lograr la viabilidad de este desarrollo se requiere la optimización de los tiempos de trabajo, buscando disminuir los períodos de inactividad de los equipos e incrementar su disponibilidad.

Las empresas que operan en estos sectores productivos tienen la necesidad de contar con indicadores mensuales y anuales, como lo son la disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad, con el objetivo de mejorar los índices asociados e impulsar la mejora continua de los distintos sectores.

### **1.1. Definición del problema**

En los últimos años, las empresas productoras de gas y petróleo, tuvieron una reducción considerable de sus utilidades debido a la gran caída que experimentó el precio del petróleo, sumado a las condiciones políticas y económicas internacionales. Esta problemática motivó a las organizaciones a buscar alternativas que permitan reducir sus gastos a partir de la optimización de sus recursos. En este sentido, una empresa internacional con base operativa en la cuenca neuquina, que por razones de confidencialidad se identificará con el nombre de fantasía “La Empresa”, comenzó a incentivar con mayor énfasis a los sectores de diseño y proyecto de instalaciones, e ingeniería de mantenimiento, para cumplir con estos requisitos.

En el año 2015, “La Empresa” logró expandir su producción con una nueva planta compresora para un caudal de gas de 1,0 MM Sm<sup>3</sup> /d de gas. Bajo este diseño de planta, y con un aumento en la producción y proyección de gas en la cuenca Neuquina, se desarrollaron 2 plantas compresoras gemelas incorporadas en los años posteriores, logrando triplicar su producción mediante la operación de 15 motocompresores paquetizados con motores Waukesha 7044GSI y compresores Ariel JGK-4.

Transcurridos ya varios años desde la incorporación de la última planta compresora,

---

y con el propósito de garantizar una adecuada operación, se modificaron los objetivos operativos enfocándose en la optimización de los recursos disponibles. En función de esto, desde el área de ingeniería de mantenimiento de la empresa, se plantearon metas más rigurosas tendientes a garantizar una mejora en los indicadores de disponibilidad y confiabilidad de los equipos productivos.

## **1.2. Justificación**

El área de ingeniería de mantenimiento es de gran importancia en las empresas operadoras, donde se ha demostrado que la implementación de políticas de mantenimiento adecuadas, optimizan los recursos disponibles y aumentan la productividad de las instalaciones.

El presente trabajo se desarrolló a partir de una solicitud de pasantías para estudiantes de la carrera Ingeniería Mecánica, propuesta por “La Empresa”. El plan de trabajo inicial tenía como objetivo la identificación de válvulas de los compresores al momento de ser sustituidas, de forma tal que permitiera realizar un reporte de fallas y llevar a cabo un seguimiento necesario de los modos de falla presentes. Con el transcurso de la pasantía y en función de las necesidades de la empresa, esta actividad inicial se fue ampliando y enfocando en las principales fallas que afectan y reducen la disponibilidad de los motocompresores.

Para efectuar las tareas planteadas, se utilizó como punto de partida la información recopilada de los datos históricos de los motocompresores para el año 2019. A partir de esta información, se desarrollaron distintas metodologías prácticas para el análisis contemplando desde la identificación de las detenciones con mayor recurrencia y la causa raíz de las mismas, hasta la confección de posibles acciones de mejoras para cada situación. Estas actividades se realizaron en las instalaciones de “La Empresa”, tanto en la planta compresora de gas, situada en la zona de Lindero Atravesado en la provincia de Neuquén, como en sus oficinas administrativas ubicadas en el centro de la ciudad de Neuquén Capital.

---

## 2. OBJETIVO

Implementar herramientas e instrumentos avanzados, que se utilizan comúnmente en mantenimiento de equipos, con el fin de identificar los principales causantes del exceso de detenciones no programadas que afectan a los motocompresores de gas de "La Empresa". En función de lo expuesto, se pretende:

- Determinar la confiabilidad de los ítems críticos a partir de los análisis de datos de vida.
- Establecer oportunidades de mejora para aumentar la disponibilidad de los equipos.

## 3. MARCO TEÓRICO

### 3.1. Descripción del proceso

Una planta compresora de gas es una instalación que cumple con la función de tratar el gas natural que ingresa a la misma, de forma tal que este adquiera las condiciones requeridas para su venta. Elevando también la presión del gas mediante equipos motocompresores, necesarios para su provisión (venta) hasta el punto de entrega.

La planta compresora estándar bajo estudio fue diseñada para realizar la separación, compresión y deshidratación del gas proveniente de los pozos pertenecientes a la Empresa (ver Figura 1). Los líquidos (agua o crudo) obtenidos son enviados a tanques de almacenamiento de las Baterías. El diseño contempló su operación con un caudal de gas de 1.000.000 Sm<sup>3</sup>/d. Los servicios de planta están dimensionados para operar con la máxima capacidad de la misma.



Figura 1. Vista general de la Planta.

En el Anexo I (A), se expone el diagrama de flujo de la Planta Compresora que nos permite conocer la ubicación de los distintos equipos que conforman la planta, y que se describen a continuación detallando el proceso de compresión de gas y la función asignada a cada uno de ellos.

La planta se conforma por 5 (cinco) Motocompresores paquetizados de acuerdo con los estándares regionales. Estos equipos se componen de motores Waukesha 7044GSI y compresores Ariel JGK-4. El sistema de compresión opera con una presión de succión de  $2 \text{ kg/cm}^2$  y una presión de descarga de  $71 \text{ kg/cm}^2$  (ver Figura 2).



Figura 2. Equipo motocompresor.

Los principales equipos de proceso definidos con el concepto de modularidad son:

- Separador de Succión Horizontal.
- *Knock Out Drum* (KOD).
- Filtros Coalescentes (dos unidades).
- Pulmón de Aire de  $12 \text{ m}^3$  (dos unidades).
- *Skid* de Deshidratación.
- *Skid* Gas Combustible y *Blow Case*.

---

Cada uno de estos equipos se encuentra paquetizado y montado sobre *Skid*, a fin de facilitar su instalación y movilidad. El gas de salida especificado contiene 65 mg/m<sup>3</sup> de agua a la salida del *Skid* de Deshidratación.

A continuación, se describen las unidades de proceso:

1. **Sistema de Ingreso de Planta y Separación:** la producción disponible es canalizada a través de una línea 24" de ingreso general a planta hasta el Separador de Succión. Este tiene la capacidad para recibir 1000000 Sm<sup>3</sup>/d de gas con una presión absoluta de operación de 3 kg/cm<sup>2</sup> y una temperatura operativa de 30°C. En este equipo se realiza la separación bifásica de gas y líquidos.
  2. **Sistema de Compresión:** la producción proveniente del Separador de Succión es distribuida a través del colector de succión y queda a disposición de los equipos de compresión. Los mismos son del tipo 7044 JGK-4 con una potencia de 1680 HP y tienen la capacidad para comprimir 200.000 Sm<sup>3</sup>/d de gas (cada uno), con una presión y temperatura de succión de 2 kg/cm<sup>2</sup> y 30°C, y una presión y temperatura de descarga de 71 kg/cm<sup>2</sup> y 35°C.
  3. **Sistema Colector de Descarga:** la producción proveniente de los compresores (MC 1/2/3/4/5) es distribuida a través del colector de descarga en donde la producción es enviada hacia los Filtros Coalescentes, como así también, para la recirculación que mantiene estable la presión en el colector de succión.
  4. **Sistema de Filtros Coalescentes:** la producción proveniente de los compresores y canalizada a través del Colector de Descarga ingresa en ambos filtros. Estos son del tipo coalescente y cada uno de ellos con capacidad de filtrar 1.000.000 Sm<sup>3</sup>/d a una presión de operación de 71 kg/cm<sup>2</sup>.
  5. **Sistema de Deshidratación y Salida de planta:** la producción proveniente de los filtros pasa en su totalidad por la Torre Contactora para completar el proceso de deshidratación. La mencionada torre tiene la capacidad de deshidratar hasta 1.000.000 Sm<sup>3</sup>/d a una presión de operación de 71 kg/cm<sup>2</sup>.
  6. **Sistema de Regeneración de Glicol:** su función principal es eliminar los contenidos de gas y condensados del Glicol húmedo, y reconcentrarlo para su reutilización
-

en el proceso de deshidratación del gas.

7. **Sistema de drenaje abiertos:** este sistema converge en el tanque soterrado. Este tanque es del tipo ecológico con una capacidad de 12 m<sup>3</sup>/h, presión de operación atmosférica y una temperatura de trabajo de 35°C.

En este sistema también podemos encontrar una bomba, la cual se utiliza para evacuar los líquidos del tanque por medio de camiones. Esta bomba es del tipo a diafragma la cual está en condiciones de bombear un caudal máximo de 170 L/min, su presión de succión es 0,5 kg/cm<sup>2</sup> mientras que la descarga puede llegar a alcanzar los 8 kg/cm<sup>2</sup>.

8. **Sistema de Drenaje Presurizado:** este sistema está constituido por un *Blow-Case* diseñado con una presión de 9 kg/cm<sup>2</sup> y una presión de operación máxima de 5 kg/cm<sup>2</sup>. Este sistema recibirá los drenajes presurizados de los equipos de la planta compresora.

El líquido acumulado en el *Blow-Case* se envía posteriormente a la Batería Oriental 1. Para que el mismo pueda ser evacuado, el sistema de control realizará la presurización por medio de apertura y cierre de las válvulas y luego abrirá la válvula de descarga de líquidos.

9. **Sistema de Venteo:** el gas proveniente de los sistemas de venteo se separa de los líquidos que pudiera contener en el *Knock Out Drum* antes de ser enviados a Batería 1 y quemados en la antorcha. Los líquidos son evacuados a través de las bombas tipo a tornillo, que envían los líquidos al colector de drenaje de las Baterías. Las bombas mencionadas tienen la capacidad de evacuar un caudal de 5 m<sup>3</sup>/h con una presión de descarga máxima de 7 kg/cm<sup>2</sup>.

Cada una de las bombas, están calculadas para evacuar la totalidad del caudal, Por tal motivo, funcionará una como primaria y la otra en *stand by*. El arranque de las bombas dependerá de la selección del Operador, teniendo como opción una o la otra, de manera que el sistema deja fuera de servicio la bomba no seleccionada.

El Sistema de Venteo se compone de:

---

- *Knock Out Drum*, capacidad máxima de 1.000.000 Sm<sup>3</sup>/d de gas y 20 m<sup>3</sup>/h de líquido, con una presión de operación de 0,45 kg/cm<sup>2</sup>.
- Bombas a tornillo, presión de descarga máxima de 7 kg/cm<sup>2</sup>, y caudal máximo 5 m<sup>3</sup>/h.
- Antorcha, diámetro nominal pico 24", altura total 48 m.

### 3.2. Sistema de Compresión

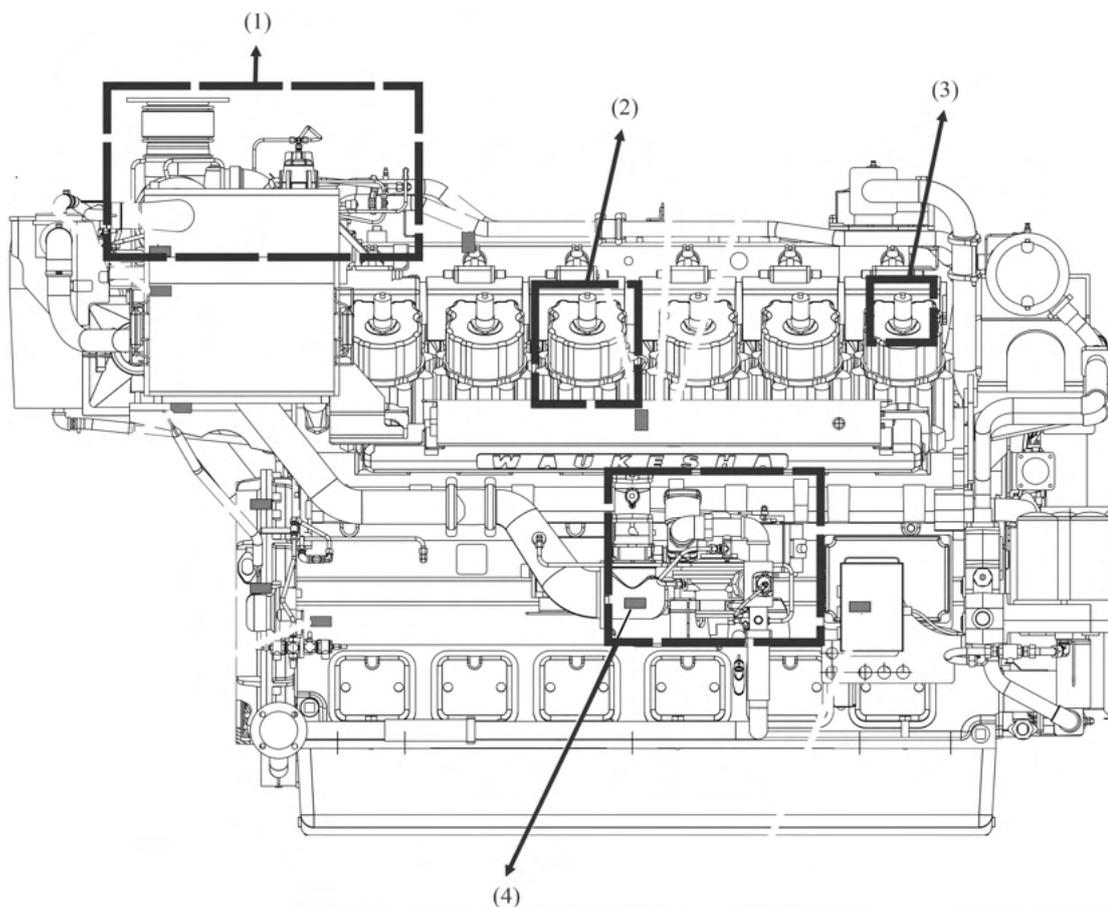
A continuación, en la Tabla 1 se presenta la ficha técnica del Motocompresor:

Tabla 1. Ficha técnica del Motocompresor

MOTOR WAUKESHA VHP L-7044-GSI ESM	
Nro. de cilindros y distribución	12 - V
Diámetro x Carrera	9.375" x 8.5" (238 x 216)
Potencia	1680 <i>HP</i>
Cilindrada	115 <i>L</i>
Velocidad máxima	1200 <i>RPM</i>
Relación de compresión	8:1
Rango de operación	850-1150 <i>RPM</i>
Capacidad circuito lubricación	719 <i>L</i>
Carga de operación	90-98 %
Capacidad circuito enfriamiento	379 <i>L</i>
DATOS OPERATIVOS	
Aceite utilizado	PEGASUS 1005
Temp. de agua normal (OUT)	85°C
Grado SAE	40
Presión gas combustible	5-10 <i>PSI</i>
Presión de aceite normal	45-50 <i>PSI</i>
Presión diferencial filtro máxima	10-12 <i>PSI</i>
Temp. de aceite máxima (OUT)	90°C
COMPRESOR ALTERNATIVO ARIEL JGK/4 DE 3 ETAPAS	
Nro. de cilindros	4
Carrera	5 1/2 "
Potencia máxima requerida	1272 <i>HP</i>
Espacios nocivos	Variable
Tipo cilindros 1ra etapa	15-7/8K
Diámetro cilindros 1ra etapa	15,875"
MAWP	635 <i>PSI</i>
Espacios nocivos H.E (%)	24,33 %
Espacios nocivos C.E (%)	-
Tipo cilindros 2ra etapa	11 K
Diámetro cilindros 2ra etapa	11"
MAWP	1270 <i>PSI</i>
Espacios nocivos H.E (%)	0,75 %
Espacios nocivos C.E (%)	-
Tipo cilindros 3ra etapa	7-1/4 K
Diámetro cilindros 3ra etapa	7,25"
MAWP	900 <i>PSI</i>
Espacios nocivos H.E (%)	0,59 %
Espacios nocivos C.E (%)	-

### 3.2.1. Motor

Los motores Waukesha VHP L-7044 GSI, tiene 12 cilindros con una distribución en V, consumiendo una mezcla rica (estequiométrica). Están equipados con turbocompresores que incrementan la presión del *manifold* de entrada, aumentando de esta forma la capacidad de carga del motor (ver Figura 3).



1) Sistema turbocompresor

3) Sistema de encendido

2) Sistema de distribución

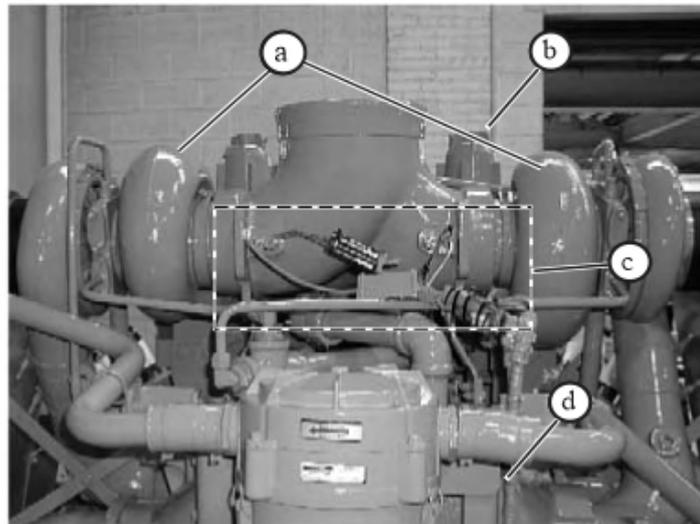
4) Sistema de alimentación de combustible

Figura 3. Motor Waukesha L-7044 GSI (GEC<sub>o</sub>, 2017).

Para poder realizar un estudio sobre las fallas no programadas de los equipos motocompresores es necesario conocer y comprender el funcionamiento de los distintos componentes que conforman la máquina. Para ello, se describirán los subsistemas del motor que se encuentran más comprometidos en las fallas recurrentes. Entre ellos tenemos:

1. **Sistema Turbocompresor:** es el sistema que emplea la energía de los gases de

escape, con el fin de comprimir el aire en la admisión del motor. De esta forma, se logra obtener un aumento en la carga del motor (Ver Figura 4).



a) Turbocompresor      b) Válvula Wastegate  
c) Termocuplas de Escape      d) Intercooler

Figura 4. Sistema turbocompresor (GECó, 2017).

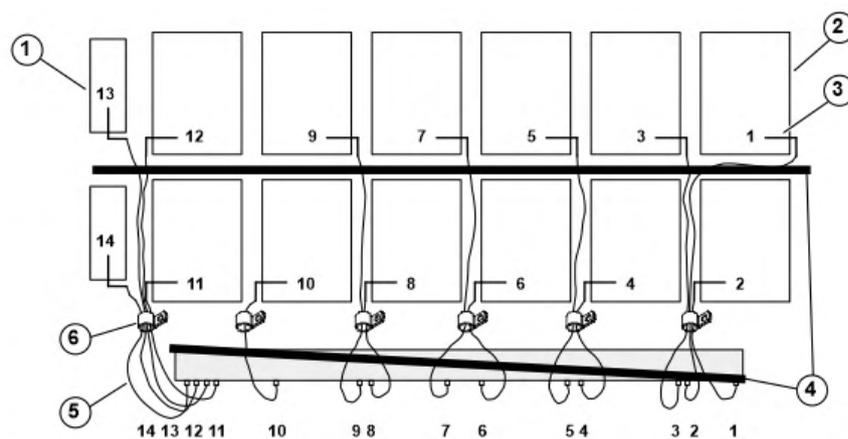
En referencia a la figura anterior, a continuación se describen los componentes principales:

- a) Turbocompresor: componente principal del sistema, compuesto por una rueda de turbina conectada por un eje principal a un compresor. De esta forma, los gases de escape ingresan a la turbina y la hacen girar a gran velocidad, por lo que la rueda del compresor de admisión gira a la misma velocidad, comprimiendo el aire de admisión.
- b) Válvula *Wastegate* (válvula de descarga): es un dispositivo limitador de carga. Se activa cuando la presión del colector de admisión supera el límite aceptable, permitiendo la apertura de la válvula para desviar una parte de los gases de escape al conducto de salida hacia la atmósfera. Este componente suele tener inconvenientes cuando circula por su interior algún líquido, ya sea aceite o líquido refrigerante.

c) **Termocuplas de Escape:** estos instrumentos son parte del sistema de escape, y se utilizan para controlar la temperatura de escape del motor. Las altas temperaturas de escape aumentan en gran medida el potencial de detonación y tienen un impacto directo en la vida de muchos componentes del motor.

Las termocuplas se montan en los puertos de escape de cada segmento del colector para medir la temperatura de gas a la salida de cada cilindro. Además, se instala una termocupla antes de cada turbocompresor, de forma tal de reflejar la temperatura promedio de escape del banco de cilindros (ver Figura 5).

d) **Intercooler:** el aire que se calienta al pasar por el compresor (por el mismo efecto de la compresión). Este calentamiento es indeseado, dado que los gases al calentarse pierden densidad, con lo que la masa de oxígeno por unidad de volumen disminuye. Esto provoca que la eficiencia volumétrica y la potencia del motor disminuyen, ya que hay menos oxígeno para la combustión. Por lo tanto, el objetivo del *intercooler* es enfriar ese aire, y a causa de ello aumentar su densidad y por tanto la masa de aire que entra en el motor, lo que mejora su rendimiento.



- |  |                         |
|--|-------------------------|
| 1) Codo de entrada del turbo de escape | 4) Conducto de termopar |
| 2) Selección del colector de escape    | 5) Cables de termopar   |
| 3) Termopar de escape                  | 6) Clip de retención    |

Figura 5. Esquema de la distribución de las termocuplas de escape (GECó, 2017).

2. **Sistema de Distribución:** es el sistema que controla las interconexiones entre el interior del cilindro y el medio externo, con el objetivo de permitir el ingreso de carga fresca y el egreso de gases quemados (ver Figura 6).

- a) Válvulas: elementos que permiten el ingreso y egreso de los gases durante el ciclo del motor. Se fijan a la tapa de cilindro mediante un par de trabas cónicas, un plato y un resorte. Además de estos componentes, en el extremo superior de la válvula se coloca un rotador, que busca generar que el desgaste en la válvula sea homogéneo y no localizado.
- b) Botador: elemento que transmite el movimiento del árbol de levas al balancín, para lograr la apertura y cierre de las válvulas de admisión y escape.
- c) Tapa de Cilindro: elemento superior del motor, que alberga el sistema de válvulas de ingreso y egreso, y es el extremo superior de la cámara de combustión. Internamente, este bloque tiene pasajes que permiten la circulación del líquido refrigerante, manteniendo una temperatura de operación consistente.

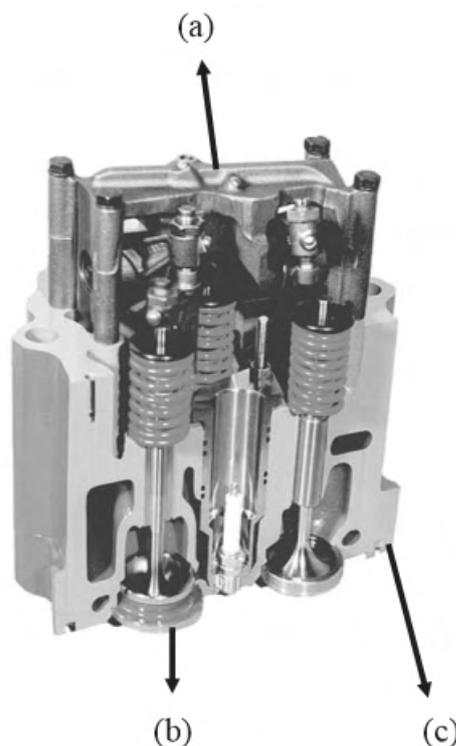


Figura 6. Sistema de distribución (GECó, 2017).

3. **Sistema de Encendido:** su función principal es iniciar el quemado de la mezcla del motor a explosión, en el momento indicado y con la energía adecuada. Se compone de los siguientes elementos principales (ver Figura 7):

a) Bujía: elemento que genera la chispa entre electrodos, y de esa forma llevar parte de la mezcla a la temperatura de autoencendido. La tensión que se requiere para el comienzo de la ignición varía con los siguientes factores:

- Bajas temperatura de operación.
- Altas relaciones de compresión.
- Aumento de carga del motor.
- Luz entre electrodos.
- Electrodo redondeados.
- Depósitos en los electrodos.
- Polaridad inversa.
- Avance del encendido.

El aspecto de este componente cuando es reemplazado proporciona valiosa información sobre la causa de falla del mismo y sobre el comportamiento del motor a lo largo del tiempo.

b) Bobina: elemento que eleva la baja tensión con el objetivo de entregar, a la bujía de ignición, la cantidad de energía adecuada para la combustión de la mezcla.

c) Extensión de la bujía: elemento que conecta directamente a la bobina con la bujía.

d) Cable de la Bujía: conecta al módulo de encendido con la bobina.

e) Disco de Sincronización: elemento que provee información sobre el orden de encendido de los cilindros. Está compuesto por seis sensores inductivos ubicados en el volante que designa el encendido de cada cilindro, y un sensor ubicado en el engranaje del árbol de levas, el cual brinda la información del inicio del ciclo de compresión.

---

f) **Módulo de Encendido Digital (IPM-D):** este sistema recibe la señal del disco sincronizador con el orden de encendido de los cilindros y brinda una descarga capacitiva sobre la bobina de ignición, proporcionando la energía necesaria para cada cilindro.

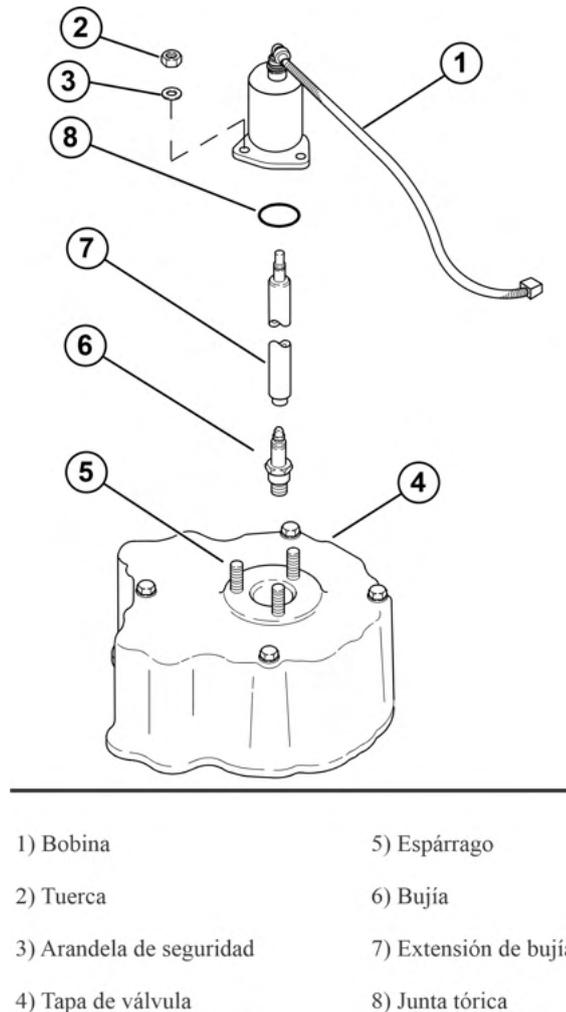


Figura 7. Sistema de encendido-Componentes (GECó, 2017).

4. **Sistema de Alimentación de Combustible:** es el sistema responsable de mantener y proporcionar una mezcla y caudal de Aire-Combustible adecuado para todo el rango de carga del motor (ver Figura 8). Los principales componentes de este sistema son:

a) **Cuerpo del Carburador:** cuerpo físico donde se mezclan los gases para la combustión.

- b) Mariposa del Acelerador: elemento que regula la carga de la mezcla aspirada por el motor, con el fin de controlar la potencia entregada por el mismo.
- c) Regulador Fisher 99: regulador de gas que permite evitar variaciones en la presión del carburador, manteniendo constante la diferencia de presiones entre la presión del gas y la del carburador constante.
- d) Regulador de velocidad: tiene como función mantener constante la velocidad establecida ante posibles variaciones de la carga.
- e) Válvula de Control de Flujo (FCV): válvula ubicada entre el regulador Fisher 99 y el carburador, con el objetivo de controlar el caudal de combustible, logrando pasar de una condición funcionamiento de ralentí a una máxima potencia, sin descalibrar el regulador Fisher 99.
- f) Sensor de Oxígeno: sensor que mide la composición de los gases de escapes.
- g) Sistema de Control de Aire-Combustible (AFR2): sistema que controla la relación Aire/Combustible, el cual toma la señal del sensor de oxígeno para corregir la calidad de la mezcla.

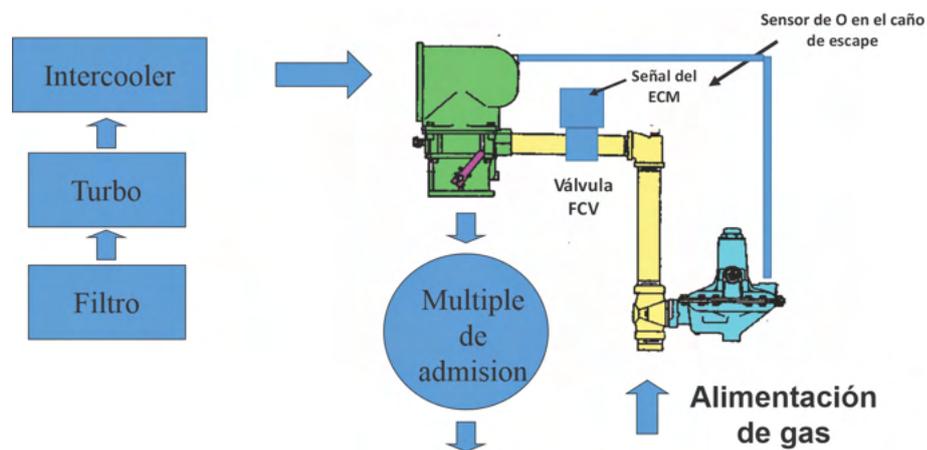


Figura 8. Sistema de alimentación de combustible (Bugna, 2020)

5. **Sistema de Control:** este sistema incorporar las nuevas tecnologías con el objetivo de mejorar, entre otros parámetros, su *performance* y disminuir los niveles de contaminación. A tal fin, se contemplan los siguientes aspectos:

- a) Sistema de Control de Combustible (AFR2): es un sistema desarrollado para

motores estequiométricos de Waukesha, que controla la relación aire /combustible y reemplaza a la anterior tecnología AFR.

Utiliza la información de los sensores de oxígeno que se encuentran a la salida de los gases de escape, con el fin de corregir la calidad de la mezcla permitiendo un mayor ingreso de aire al sistema. Además de esto, a partir del control de la válvula Fisher 99, aumenta o disminuye la presión del gas que alimenta el carburador, con el objetivo de ajustar el valor del combustible requerido.

A esto se le suma la incorporación de una válvula, conocida como FCV, entre el regulador Fisher y el carburador, la cual permite variar el caudal de combustible que se alimenta al carburador de forma electrónica. La señal es controlada por el módulo de control electrónico (ECM), el cual forma parte del sistema AFR2.

Este instrumento permite proveer el caudal de combustible necesario al momento en que el motor trabaje en ralentí o en máxima potencia, variando la apertura de la válvula entre dos posiciones extremas.

*b)* Sistema de Gestión Centralizado (ESM): es un sistema de gestión total del motor, permite una adecuada comunicación con el usuario mediante una interfaz hombre-máquina, incorporando indicadores lumínicos en un panel digital y una pantalla táctil (ver Figura 9). Su diseño permite:

- Controlar el módulo de encendido (IPM-D).
  - Controlar la detonación.
  - Actuar como regulador de velocidad.
  - Controlar y realizar el proceso de arranque-parada.
  - Mejorar el control en la calidad de mezcla (AFR2).
  - Aumentar las protecciones del motor.
  - Generar un registro de fallas, tanto de alarmas como paradas de emergencia.
  - Facilitar el diagnóstico del sistema.
  - Controlar la contaminación, si el motor utiliza catalizadores.
-

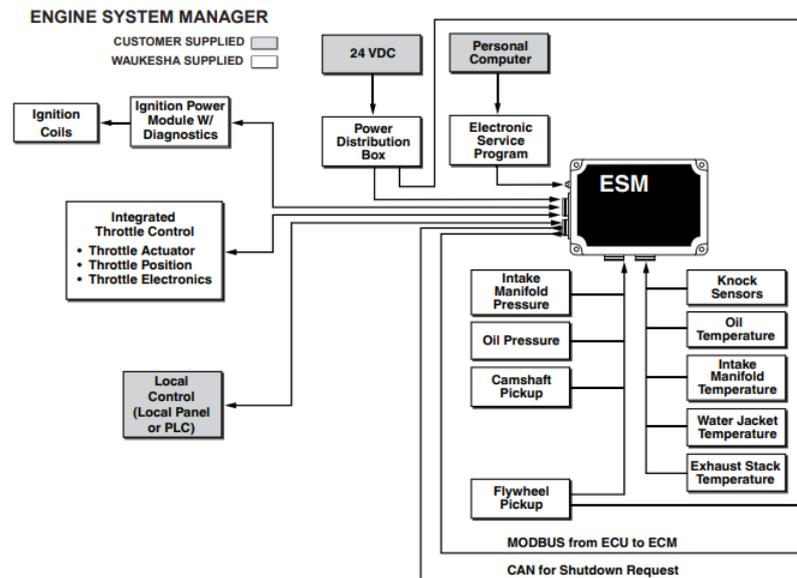


Figura 9. Esquema del ESM (GEC0, 2017).

### 3.2.2. Compresor Alternativo

Los equipos Ariel JGK-4 son compresores recíprocos de doble efecto de tres etapas de compresión con cuatro pistones, donde cada cilindro cuenta con tres válvulas de succión y tres de descarga (ver Figura 10)



① Sistema de distribución

② Sistema de compresión

Figura 10. Compresor alternativo Ariel (<http://exploreariel.com>).

A continuación, se describirán sus principales componentes (ver Figura 11) comprometidos en las fallas más recurrentes durante la operación:

- a. **Válvulas del Compresor:** elementos que permiten el ingreso y egreso del gas a la cámara de compresión. Trabajan por diferencia de presión, entre la presión del gas y la fuerza que ejerce los resortes interiores de la válvula.

Este componente es el más perjudicado cuando la operación de equipo es incorrecta o ingresan algún agente extraño al cilindro. Los fabricantes suelen brindar información específica sobre los posibles efectos de fallas de las válvulas de compresor durante la operación del equipo.

- b. **Packing de Gas:** dispositivo que cumple con la función de evitar fugas de gas del cilindro al exterior.
- c. **Pistón:** elemento que permite efectuar la compresión del gas, impulsado el sistema biela manivela que transmite la rotación del cigüeñal.
- d. **Conjunto de Aros de Pistón:** su función principal es evitar el flujo de gas por los laterales del pistón, y de esta forma mantener la presión de la cámara sin pérdidas.

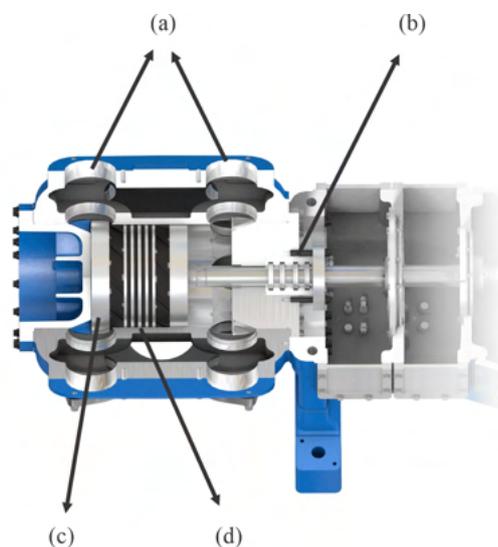


Figura 11. Componentes críticos del compresor (<http://exploreariel.com>).

### 3.3. Metodología propuesta

Para el desarrollo de este trabajo se emplea una metodología adaptada a partir de la propuesta dada por (Mora, 2009). Esta tiene como objetivo la disminución de la cantidad de detenciones no programadas en los equipos motocompresores de gas (ver Figura 12).

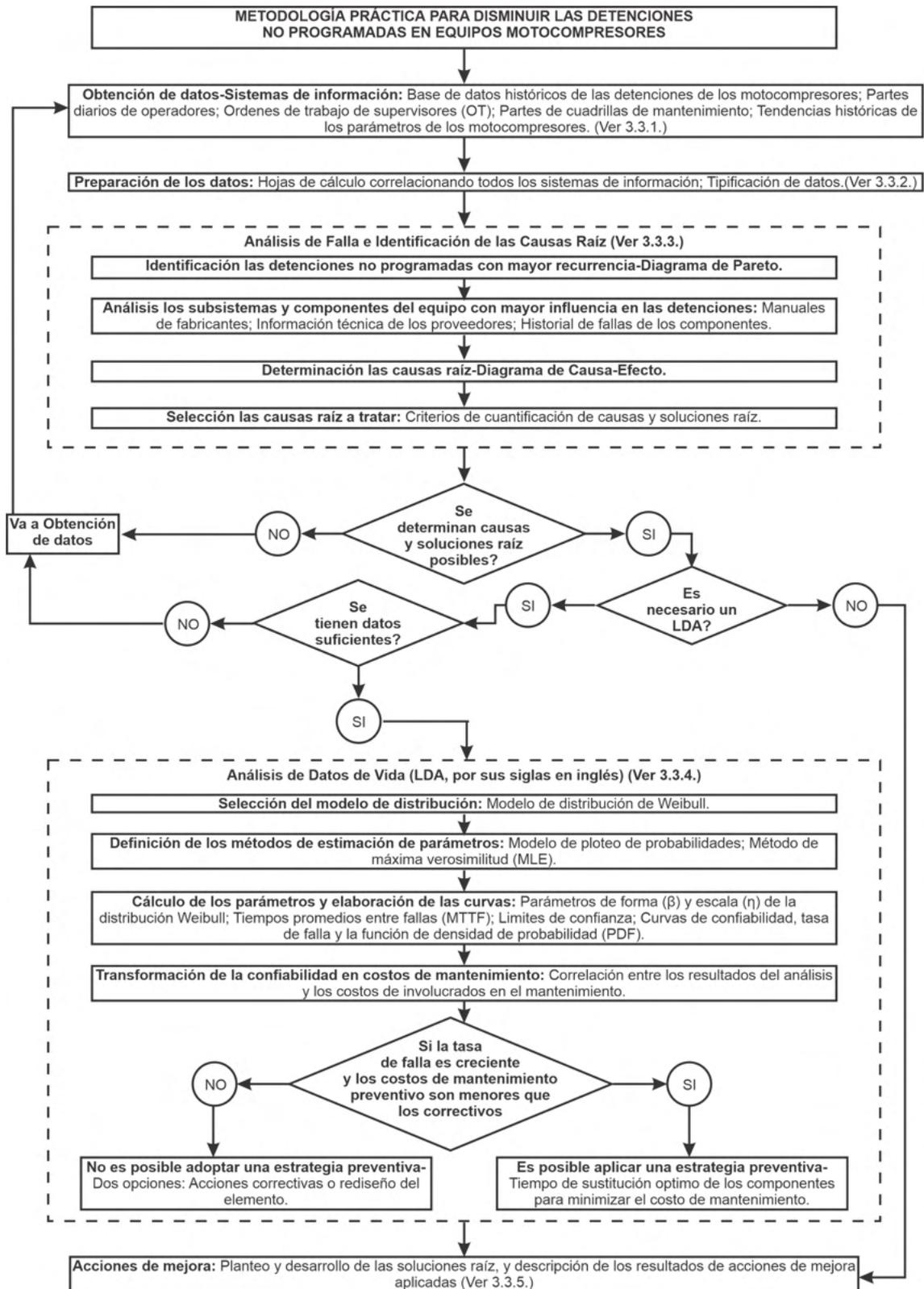


Figura 12. Metodología propuesta.

### 3.3.1. Obtención de datos-Sistema de información

La información es el epicentro de mantenimiento, y es necesaria para determinar todos los signos vitales que ocurren para consolidar una estrategia adecuada de mantenimiento (Mora, 2009). Los distintos medios de donde se obtiene esta información son:

1. **Partes Diarios:** son documentos que brindan el reporte diario de novedades operativas. En este se informa sobre el rendimiento productivo, el estado y el motivo de detención de cada equipo, y el estado de producción de cada pozo.
2. **Registro de detenciones del motocompresor:** el sistema SCADA es una herramienta de automatización y control industrial utilizada en los procesos de producción. Este permite controlar, supervisar, recopilar y analizar datos, generando informes a distancia mediante una aplicación informática. Cuando el equipo se detiene, el sistema notifica al personal, mediante una alarma, especificando cuál de sus indicadores es el que experimentó un desvío del rango normal de funcionamiento.
3. **Ordenes de trabajo (OT):** es un documento que contiene todas las especificaciones que el servicio requiere. Luego de completada la tarea, el supervisor a cargo verifica el documento y guarda una constancia digital para su posterior procesamiento.
4. **Partes de cuadrillas de mantenimiento:** es un documento que proporciona la cuadrilla de mantenimiento al supervisor, donde se describen las acciones específicas que se realizaron para poner el equipo en marcha, detallando: el equipo, los repuestos, el personal y el tiempo de trabajo necesario.
5. **Parámetros de motocompresor:** los parámetros del motocompresor registrados por el SCADA o visualizados desde pantallas HMI montadas sobre el equipo. Son de gran apoyo para conocer el estado de la máquina, las razones de las detenciones y los componentes afectados.

### 3.3.2. Preparación de datos

Esta etapa de la metodología requiere de un arduo y extenso trabajo en donde se correlaciona toda la información obtenida en los distintos sistemas de información. De esta

---

forma se logra comprobar que no haya desviación en los datos recopilados y crear una hoja de cálculo con los parámetros necesarios para poder efectuar el análisis sobre las detenciones no programadas.

### **3.3.3. Análisis de falla**

A la hora de buscar una mejora en la confiabilidad operacional de una instalación, existen limitaciones en la aplicación de estas metodologías. Lamentablemente, tanto los recursos económicos como humanos que una empresa dispone no son ilimitados, por lo que es de vital importancia enfocar las mejoras a los elementos más críticos y las fallas más recurrentes de estos sistemas. Con este fin se aplican los análisis de fallas de forma tal de lograr de comprender y controlar las fallas que estos aquejan.

Se establecen dos tipos de fallas: a) crónicas y b) esporádicas. Las fallas crónicas son eventos muy frecuentes, pero cuando se eliminan o se controlan se logra restaurar la funcionalidad a su punto máximo y se eleva el nivel esperado del desempeño. Son repetitivas, no dramáticas y casi siempre son fáciles de corregir. Sin embargo, son difíciles de controlar o erradicar (sólo se puede lograr al aplicar análisis de fallas con el debido componente de ingeniería), se aceptan como parte normal de los costos de producción.

Cada evento de falla crónica tiene generalmente un impacto relativamente bajo, pero cuando se totaliza en el transcurso de un período de tiempo y se combina con otras fallas crónicas, afecta de forma muy notoria la economía de la empresa. Al encontrar la causa raíz de las fallas crónicas y controlarlas, se logra: aumentar la productividad, elevar los índices de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad (CMD), mejorar la rentabilidad y el desempeño, maximizar la productividad y, por ende, la competitividad (Mora, 2009).

Se propone, en primera instancia, utilizar el Diagrama de Pareto para establecer las detenciones no programadas con mayor recurrencia. Esta es una herramienta estadística sencilla que se caracteriza como una distribución de frecuencias, donde sobre el eje de abscisa se ordenan los datos por cantidad de ocurrencia, y sobre el eje de ordenadas se representan los totales acumulados de los mismo. Se observa que el 20 % de los defectos implican el 80 % del total de fallas asociadas, también conocido como principio de Pareto. De esta forma, se logra identificar objetivamente los problemas principales, de los mismos.

---

Posteriormente, a partir del conocimiento de los distintos bloques y componentes de los equipos involucrados en las detenciones no programadas más recurrentes, y la recopilación de información de los distintos sectores de la empresa, se podrán establecer aquellos que tienen mayor incidencia y requieren una especial atención.

Contemplando los efectos con mayor recurrencia, que afectan a la disponibilidad de los equipos motocompresores, se requiere establecer las posibles causas responsables de su ocurrencia. Una de las herramientas más utilizadas para realizar este tipo de análisis es el Diagrama de Causa y Efecto. Esta herramienta, desarrollada en Japón por el ingeniero Kaoru Ishikawa en el año 1953 (Ishikawa, 1989), es utilizada para identificar las posibles causas de un problema específico. Para su implementación, se considera beneficioso reunir un grupo de personas especializadas en distintas áreas de la empresa, que conozcan el problema y brinden sus opiniones a partir de sus diferentes puntos de vista.

Para la elaboración del diagrama de Ishikawa, es muy importante la aplicación de la metodología de las 4M o 6M para la creación de las ramas principales, las cuales agrupan por categorías, y la herramienta de los 5 Porqués, donde se desglosan las causas hasta que eventualmente se logre alcanzar una causa sobre la cual pueda actuarse.

Como recomendación por parte de diversos autores (Pistarelli, 2010)(Torres, 2015), una vez desarrollado el Diagrama de Causa y Efecto, se debe plantear un método para evaluar las posibles causas raíz y calificarlas de forma cuantitativa, para establecer la acción que producirá un mejor resultado. Para ello, por ejemplo, se deberá responder y puntuar del 1-3, siendo 3 el más beneficioso y el 1 el menos beneficioso, las siguientes preguntas:

1. ¿Es un factor que lleva al problema?
  2. Esto ¿ocasiona directamente el problema?
  3. Si esto es eliminado ¿Se corregiría el problema?
  4. ¿Se puede plantear una solución factible?
  5. ¿Se puede medir si la solución funcionó?
  6. ¿La solución es de bajo costo?
-

Los valores más altos de la suma de las calificaciones, serán las acciones con mayor repercusión y con más posibilidades de realizarse.

De esta forma, y por medio del análisis de falla, se intenta abordar las distintas soluciones aplicables que brindan el mayor beneficio económico, traducéndose en una mejora sustancial de los índices que controlan la disponibilidad de los equipos.

#### **3.3.4. Análisis de datos de vida**

El análisis de datos de vida (LDA) comprende la creación de modelos estadísticos y matemáticos para estimar, mediante los datos históricos obtenidos durante su utilización, el comportamiento probabilístico a lo largo del tiempo de vida de los *ítems* seleccionados. A tal fin, se deben considerar los siguientes parámetros:

1. **Fallas:** al modelar las fallas se busca elevar la curva de confiabilidad del ítem que nos proporciona la probabilidad de suceso (Confiabilidad) o la probabilidad de falla en el tiempo de uso.
2. **Eventos:** al modelar eventos, que no son necesariamente fallas, podemos generar la curva de probabilidad de ocurrencia de evento a lo largo del tiempo.
3. **Reparaciones:** al modelar los tiempos utilizados para ejecutar una reparación de determinado ítem, estamos levantando la curva de mantenibilidad, el cual nos ofrece la probabilidad del ítem a ser reparado en un determinado período de tiempo.
4. **Accidentes:** al modelar los tiempos entre eventos de un determinado tipo de accidente, estamos levantando la curva de probabilidad de ocurrencia de este accidente a lo largo del tiempo.
5. **Errores humanos:** al modelar los tiempos entre eventos de un determinado tipo de accidente, estamos levantando la curva de probabilidad de ocurrencia de este accidente a lo largo del tiempo.

Para realizar este tipo de análisis, y crear la curva de confiabilidad de cada elemento, se recomienda desarrollar los siguientes pasos:

- **Paso 1:** Conocer que tipo de datos se tiene.
-

- **Paso 2:** Designar el modelo de distribución a utilizar.
- **Paso 3:** Definir el método de estimación de parámetros.
- **Paso 4:** Realizar los cálculos y gráficos para el análisis de confiabilidad.
- **Paso 5:** Transformar la confiabilidad en costos de mantenimiento.

A continuación, se detallan cada uno de los pasos definidos precedentemente:

### **Paso 1: Conocer que tipo de datos se tiene**

El conjunto de datos históricos que se obtiene de las investigaciones previas, proporcionarán valores en una escala numérica continua, conocidos como variables aleatorias continuas (VAC). De estas variables, se requiere desglosar los distintos tipos de datos que se utilizarán durante el análisis:

- **Datos completos:** elementos de los cuales se tienen los intervalos de operación hasta la falla de los componentes críticos.
- **Datos censurados o suspendidos:** son designados para los intervalos donde el componente se cambió preventivamente en un mantenimiento, o cuando no se aclaró correctamente la posición exacta del ítem reemplazado.
- **Datos censurados a la izquierda:** son datos suspendidos donde no se conoce el inicio de su funcionamiento. Estos se utilizan para dar comienzo al análisis y aprovechar el tiempo de funcionamiento que los componentes registran.
- **Datos en intervalo:** son datos de los cuales no se conoce el momento exacto de la falla, pero gracias a inspecciones previas, es posible establecer el intervalo posible de falla del ítem.

En este trabajo, se utilizarán tanto datos completos como los dos tipos de datos censurados. Esto se debe a que el sistema SCADA provee con exactitud los tiempos de detenciones de los motocompresores, permitiendo el cálculo del tiempo de falla de los componentes críticos.

### **Paso 2: Designar el modelo de distribución a utilizar**

Para parametrizar y modelar matemáticamente el comportamiento de vida de los componentes críticos, es necesario seleccionar un modelo de distribución acorde con su forma

---

de falla. Entre las distintas opciones de aplicación, para el desarrollo de este trabajo, se hará énfasis en el empleo de la distribución de Weibull, debido a su capacidad de ajustarse a las otras distribuciones modificando el parámetro de forma ( $\beta$ ). Dicho parámetro, es un indicador de la medida de dispersión del comportamiento de las fallas.

Por otro lado, el parámetro Eta (parámetro de escala- $\eta$ ) refleja la vida característica a la cual el 63,2 % de la población ha fallado. A mayor valor, se tendrá un aumento de los tiempos de funcionamiento hasta su falla. El cambio de este valor modifica la curva de Densidad de Probabilidad de Falla (PDF) (1), contrayéndose la distribución al aumentar y expandiéndose al disminuir.

Por último, el parámetro Gamma (parámetro de posición- $\gamma$ ) indica el lapso en el cual la probabilidad de falla es nula. Se utiliza para ubicar el inicio de la distribución a lo largo del eje X. Usualmente este es cero por la gran dificultad de su estimación.

*Función de densidad de probabilidad tri-paramétrica:*

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t - \gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t - \gamma}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (1)$$

A partir de la ecuación anterior, se segregan las funciones utilizadas para establecer el comportamiento del componente.

*Función de confiabilidad:*

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t - \gamma}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (2)$$

*Función de probabilidad de falla:*

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t - \gamma}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (3)$$

*Función de tasa de falla:*

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t - \gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (4)$$

*Función de vida media:*

$$MTTF(t) = \bar{T} + \eta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (5)$$

Una de las ventajas significativas que ofrece la distribución Weibull consiste en que es muy operable y se acomoda a las tres zonas de la curva de la bañera o de Davies (ver Figura 13). Esta curva permite establecer las acciones óptimas de mantenimiento, ya sean: correctivas, modificativas, preventivas o predictivas.

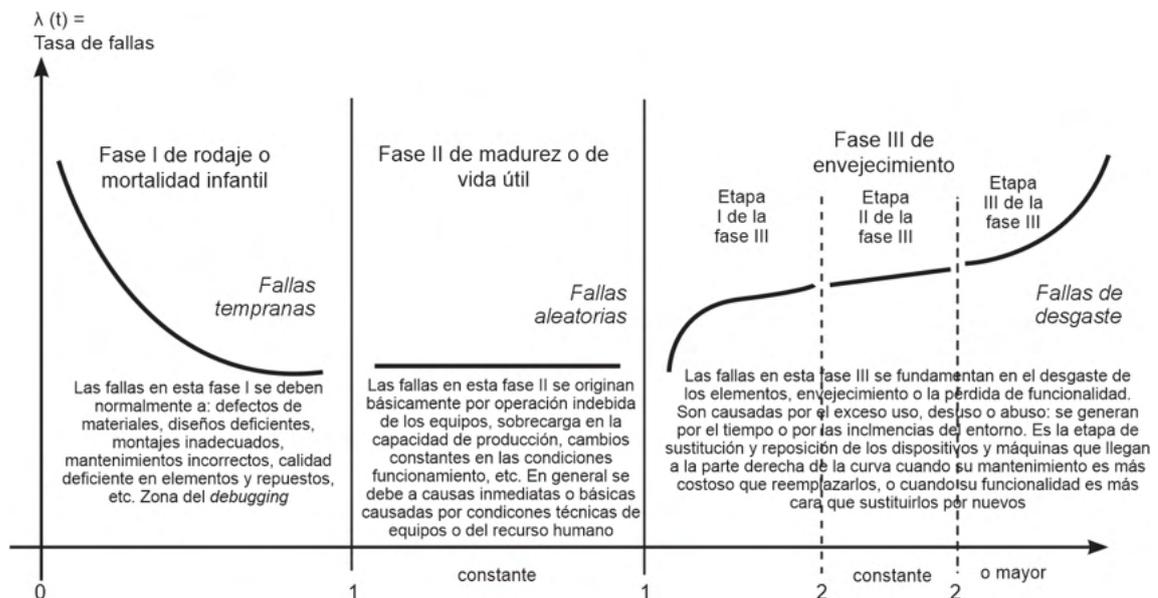


Figura 13. Curvas de Davies (Mora, 2009).

- Tasa de falla decreciente ( $\beta < 1$ ):** establece que a medida que pasa el tiempo, la probabilidad de que ocurra una falla disminuye. Usualmente, este comportamiento es causado por defectos provenientes de la fabricación, el transporte, el almacenaje o un deficiente montaje de los componentes. Estos factores producen una falla prematura en un componente, provocando que se tomen acciones de tipo correctivas y modificativas para sustentar el problema.
- Tasa de falla constante y aleatoria ( $\beta = 1$ ):** establece que las fallas ocurridas son independientes del tiempo, es decir que dos componentes similares fallaran en tiempos distintos, sin importar el mantenimiento que se le realice. Este comportamiento tiene su origen en los procedimientos humanos o de equipo. Se requerirán acciones de tipo modificativas enfocadas en el equipo y/o en el proceso, para retomar un buen funcionamiento. Por otro lado, hay componentes como los electrónicos, que tienen este comportamiento bajo su funcionamiento estándar.

- c. **Tasa de falla creciente ( $\beta > 1$ ):** muestra un incremento gradual de la tasa de falla a medida que se aumenta el tiempo de uso. Esta es la etapa donde la ingeniería de confiabilidad comienza a ejercer dominio sobre el sistema, logrando predecir el comportamiento de los componentes, de forma de poder establecer acciones preventivas y predictivas. Las fallas en esta fase III se fundamentan en el desgaste de los elementos, envejecimiento o la pérdida de funcionalidad. Son causadas por el exceso de uso, desuso o abuso: se generan por el tiempo o por las inclemencias del entorno. Esta fase tiene tres etapas:

**Etapa 1:** la tasa de falla aumenta suavemente. El desarrollo de las fallas se deben a los efectos del tiempo por causa del uso, abuso o desuso.

**Etapa 2:** la tasa de falla se incrementa de forma constante en el tiempo. En esta etapa comienza la transición de las acciones preventivas hacia las predictivas.

**Etapa 3:** la tasa de falla aumenta de forma acelerada. En esta etapa se utilizan las acciones predictivas para establecer cuando realizar la sustitución del ítem, en el momento adecuado, previo a que falle por desgaste.

### **Paso 3: Definir el método de estimación de parámetros**

Los métodos de estimación de parámetros son modelos utilizados para transformar los datos completos y censurados en los parámetros requeridos por las distribuciones de vida. En esta fase, se debe tomar la decisión de que método utilizar, teniendo en cuenta las características del conjunto de datos observados. Los más utilizados para los análisis de datos de vida son:

1. **Método de plotaje de Probabilidades:** consiste en realizar un plotaje de los datos en un gráfico especialmente construido para la distribución seleccionada del análisis. El gráfico permite realizar un ajuste, de la línea recta graficada, por medio de una regresión lineal con mínimos cuadrados, en donde se busca estimar la pendiente y ordenada al origen que minimicen el error.

Para emplear el método se requiere transformar la función de probabilidad de falla de la distribución Weibull en una función lineal. Esta transformación debe permitir calcular de forma sencilla los parámetros de forma y escala de la distribución.

---

Partiendo de la función de probabilidad de falla (1), se aplica logaritmo en ambos lados de la función para parametrizarla y obtener la ecuación de la recta.

$$\ln \frac{1}{1 - F(t)} = \beta \cdot \ln t - \beta \cdot \ln \eta \longrightarrow Y = a \cdot X - b \quad (6)$$

Siendo;

- $a = \beta$
- $b = \beta \cdot \ln \eta$

De esta forma, se pueden graficar los datos con la distribución Weibull conociendo: los tiempos entre falla ( $t_j$ ) y la probabilidad de falla de cada dato ( $F(t_j)$ ).

Al no conocerse a priori los parámetros  $\beta$  y  $\eta$ , no es posible realizar el cálculo de la probabilidad de falla de cada dato, por lo cual, es necesario realizar la estimación de la probabilidad acumulada mediante algún de los métodos existentes. Estos son: i-kaésimo, el Rango mediano (por tabla o por la aproximación de Bernard) o por el estimador de Kaplan-Meier.

Para el desarrollo de este trabajo, se aplicará la aproximación de Bernard para calcular el ranking mediano. Este método es representado en la siguiente ecuación:

$$F(t) = MR = \left( \frac{j - 0,3}{N + 0,4} \right) \quad (7)$$

Siendo:

- $j$  = Número de orden.
- $N$  = Tamaño de la muestra.

Por último, para establecer si es apropiada y válida la estimación de parámetros, bajo el método de plotaje de probabilidades, es necesario medir la calidad de la alineación que se alcanza. Para ello se utilizan varios parámetros, entre los más relevantes se encuentran: el coeficiente de determinación muestral ( $r^2$ ) y el coeficiente de correlación ( $\gamma$ ). Estos se definen como:

**Coefficiente de determinación muestral ( $r^2$ )** evalúa el grado de asociación que existe entre los puntos correspondientes a ambas variables (X e Y). El ideal es 1, pero se permite como aceptable un rango entre 0,9025 a 1,000.

**Coefficiente de correlación (r)** evalúa si el modelo se ajusta correctamente a la regresión lineal e indica la correlación que existe entre los datos y el estimador de confiabilidad. Los valores cercanos a 1 presentan una alta correlación, tomando un rango como aceptable de 0,95 a 1.

Cabe agregar que en la práctica es necesario aplicar un método especial cuando, en el conjunto de datos, tenemos datos censurados, de forma de compensar las incertidumbres que estos producen.

Un método usado para tal fin es el método de los incrementos, que consiste en calcular nuevamente los valores de posición del número j de elementos fallados de acuerdo con un nuevo número de orden asignado. El proceso parte de la clasificación de los elementos como censurados o no censurados, luego genera un incremento a partir de dicha clasificación y finalmente asigna un nuevo número de orden, de acuerdo con el incremento obtenido al valor de j el cual se denomina número de orden y es equivalente al N tratado hasta el momento en las cuatro estimaciones presentadas.

No obstante, la metodología de plotaje de probabilidades posee limitaciones cuando tenemos gran cantidad de datos suspendidos y la distribución de los datos completos no es homogénea en todo el rango de fallas.

2. **Método de la Máxima Verosimilitud (MLE):** es una técnica más robusta que el método de plotaje de probabilidades. Este método busca obtener el valor más probable de los parámetros para una distribución dada, a través de la maximización de la función de máxima verosimilitud (L), aplicada a la función de densidad preestablecida.

Una de las propiedades del MLE que motivan su utilización es su forma asintótica, la cual implica que, al aumentar el tamaño de la muestra, el valor estimado será más preciso. Sin embargo, se requerirá un tamaño de muestra mayor a 30 para alcanzar esta propiedad, y justificar su utilización.

---

Se debe tener en consideración que la solución dada por el MLE aparenta a no ajustarse bien a los datos de forma gráfica. Dado que esta es una condición habitual, no se debe utilizar el método visual para seleccionar la mejor distribución.

Otra ventaja que ofrece este método, es la posibilidad de estimar los parámetros de cualquier distribución sin verse perjudicado por la cantidad de datos censurados que posea el conjunto. Esto se debe a que en su formulación (8) se tiene en consideración tanto los datos completos como los suspendidos.

$$\ln L = \Lambda = \sum^{F_e} N_i \ln \left[ \frac{\beta}{\eta} \cdot \left( \frac{T_i}{\eta} \right)^{\beta-1} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{T_i}{\eta} \right)^\beta \right] \right] - \sum^S N'_i \cdot \left( \frac{T'_i}{\eta} \right)^\beta \quad (8)$$

$$+ \sum^{F_I} N''_i \ln \left[ \exp \left[ - \left( \frac{T''_{Li}}{\eta} \right)^\beta \right] - \exp \left[ - \left( \frac{T''_{Ri}}{\eta} \right)^\beta \right] \right]$$

Donde:

- $F_e$  = número de grupos de puntos de datos de tiempos de falla;
- $N_i$  = cantidad de veces que fallan en el  $i^{th}$  grupo de datos completos;
- $\beta$  = parámetro de forma de Weibull;
- $\eta$  = parámetro de escala de Weibull;
- $T_i$  = momento del  $i^{th}$  grupo de datos de tiempo hasta el fallo;
- $S$  = número de grupos de puntos de datos suspendidos;
- $N'_i$  = número de suspensiones en el  $i^{th}$  grupo de datos suspendidos;
- $T'_i$  = momento del  $i^{th}$  grupo de datos de suspensión;
- $F_I$  = número de grupos de datos de falla en intervalo;
- $N''_i$  = número de intervalos en el  $i^{th}$  grupo de datos intervalos de datos;
- $T''_{Li}$  = comienzo del  $i^{th}$  intervalo;
- $T''_{Ri}$  = fin del  $i^{th}$  intervalo.

En la práctica, se requiere una primera aproximación para poder efectuar correctamente la maximización de la función de máxima verosimilitud. Debido a esto, se aplicará el método de plotaje de probabilidad como estimación inicial.

#### Paso 4: Realizar los cálculos y gráficos para el análisis de confiabilidad

Los parámetros, estimados en la etapa anterior, se reemplazan en las funciones de la distribución seleccionada, a partir de las cuales se calculan y grafican los valores de interés para el análisis.

- Curva de confiabilidad:** muestra la probabilidad de un ítem de no fallar en un intervalo de tiempo. A partir de ella, y bajo estándares de la empresa, se obtendrán los tiempos de vida útil de los componentes para mantener un porcentaje determinado de confiabilidad del ítem. Este suele rondar entre el 95-98 %, en relación a la criticidad del ítem.

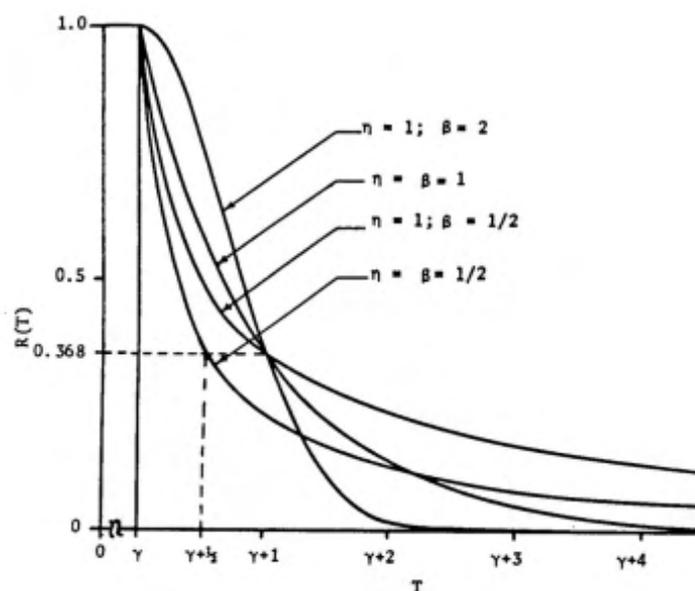


Figura 14. Curva de confiabilidad (Moreno y col., 2017).

- Curva de función de densidad de probabilidad (PDF):** presenta el comportamiento del componente, y en el caso de la distribución Weibull, su forma varía con el valor del parámetro de forma. Se puede dividir la curva en tres fases:
  - Fase I: cuando tenga la probabilidad de comenzar a fallar.
  - Fase II: cuando la mayoría de los componentes fallan.
  - Fase III; cuando todos hayan fallado.

Por lo expuesto, la forma de la curva es esencial para interpretar el comportamiento y la velocidad con la que aumenta la probabilidad de que el componente falle.

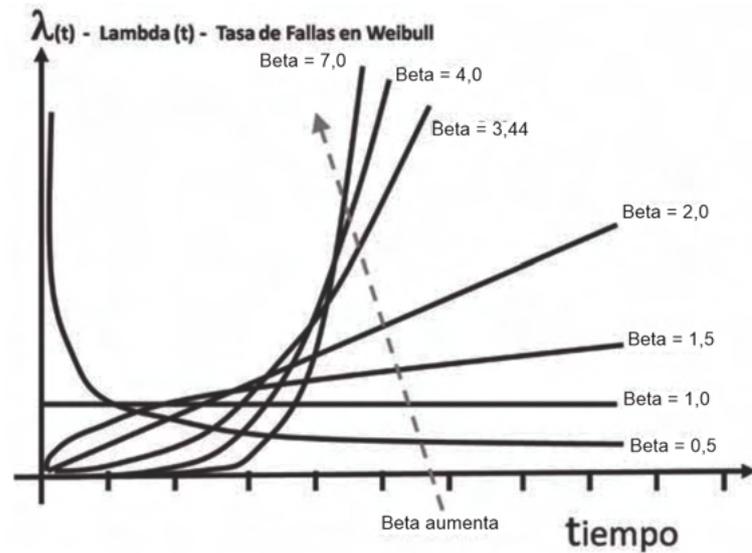


Figura 15. Curva PDF (Mora, 2009).

- **Curva de tasa de falla:** proporciona el comportamiento de las fallas a lo largo del tiempo. Como se explicó anteriormente, este factor depende del parámetro de forma, implicando distintas condiciones en la falla del componente.

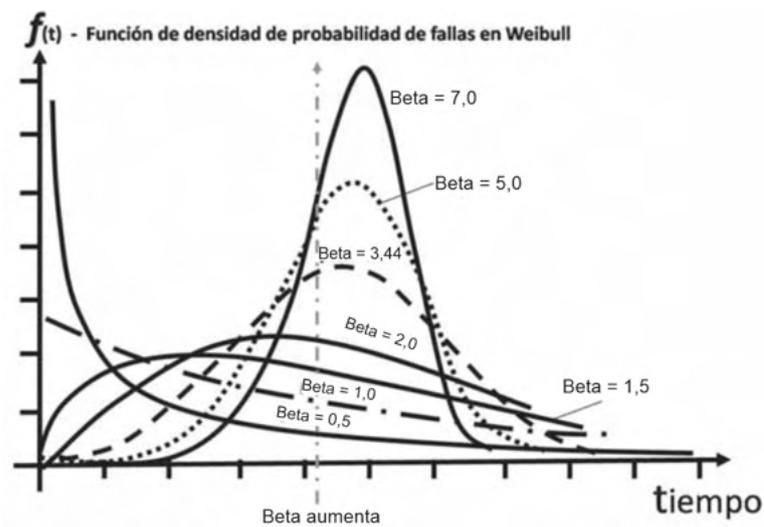


Figura 16. Curva de tasa de falla (Mora, 2009).

- **Mediana:** ofrece exactamente la confiabilidad para el 50 % de la muestra.
- **Tiempo promedio entre fallas (MTTF):** ofrece el tiempo medio de operación hasta la falla del componente. Esta medida se suele adoptar para comparar dos sistemas, ya sea el original y el rediseñado. A mayor MTTF, mejor será la confiabilidad del sistema.

No obstante, este es un parámetro engañoso y se suele llevar a errores en la comprensión del análisis. El mismo depende directamente de la función PDF y la forma que adopte, ya sea simétrica o asimétrica. Solo si la curva es simétrica, el MTTF ofrece la confiabilidad para el 50 % de la muestra. Pero para funciones asimétricas, esta condición no se cumple, y la confiabilidad que se calcula puede llegar a ser para el 87 % de las muestras.

Por este mismo motivo, aunque dos componentes tengan el mismo MTTF no implica que sean iguales, es solo la media de probabilidad (ver Figura 17).

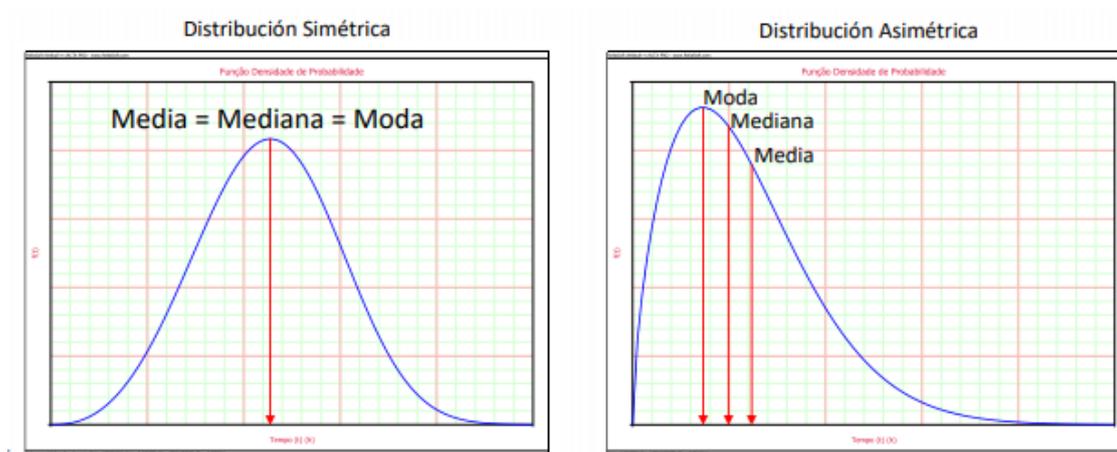


Figura 17. Curva de media, mediana y moda (<https://www.reliawiki.com/>).

- Límites de confianza:** debido a la variabilidad del muestreo, la estimación puntual en el tiempo que se realiza sobre la confiabilidad no se cumplirá para todos los casos. El valor graficado en la curva de confiabilidad representará la media de confiabilidad. Para solventar el desvío surgen los límites o intervalos de confianza, los cuales brindarán un valor de confiabilidad en función de un nivel de confianza. Con este nuevo valor se establece un rango de confiabilidad del componente delimitado por un intervalo de confianza.

En otras palabras, los límites de confianza son probabilidades que se realizan sobre las probabilidades previamente calculadas. Estos son indispensables para validar un estudio de confiabilidad. Los límites de confianza pueden ser utilizados de tres formas (ver Figura 18):

- Bilateral:** es un intervalo cerrado, en el cual se representa un determinado

porcentaje de la población. Por ejemplo, un intervalo de confianza de 90 % se traduce en que el 90 % de la población se encuentra entre un intervalo del 5 % al 95 % de confianza.

2. **Unilateral inferior:** es un intervalo abierto donde se establecen una base donde un cierto porcentaje de la población se ubique por encima del mismo. Es decir, un intervalo de confianza unilateral inferior del 95 % implica que el 95 % de la población se encuentra en un intervalo que está por arriba del 5 % de confianza.
3. **Unilateral superior:** es un intervalo abierto donde se establece un techo, donde un cierto porcentaje de la población se ubica por debajo del mismo. Es decir, un intervalo de confianza unilateral superior del 95 % implica que el 95 % de la población se encuentra en un intervalo que está por debajo del 95 % de confianza.

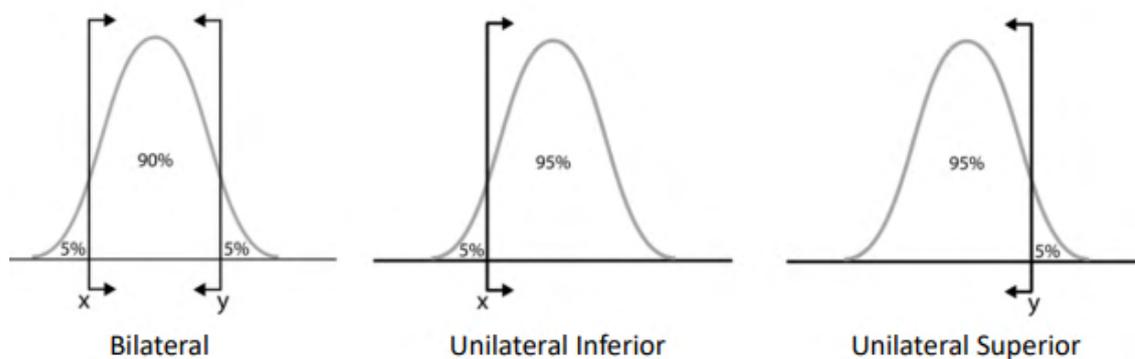


Figura 18. Formas de los límites de confiabilidad (<https://www.reliawiki.com/>).

Por otro lado, existen diferentes métodos que se utilizan para determinar los límites de confianza en los análisis LDA. Los más utilizados en la ingeniería de confiabilidad son:

1. **Matriz de Fisher (FM):** método empleado para la obtención de límites de confianza aproximados para datos completos, censurados a la derecha y en intervalos. Tiene gran uso en la mayoría de las aplicaciones estadísticas, pero tiene un defecto, tiende a ser más optimistas que los límites basados en rangos

no paramétricos. Por esta razón, no se aconseja la utilización cuando el tamaño de la muestra es pequeña.

2. **Beta Binomial (BB):** este método realiza un abordaje no paramétrico que determina los límites de confianza a través de la ecuación de la Binomial Acumulativa. Permite el cálculo de los límites de confianza de forma similar al método Ranking Mediano, con cálculos con una matemática menos intensiva. Con esta metodología, se obtienen los rangos apropiados y se grafican según el nivel de confianza deseado. Luego, estos puntos se unen mediante una curva suave para obtener el límite de confianza correspondiente (ver Figura 19).

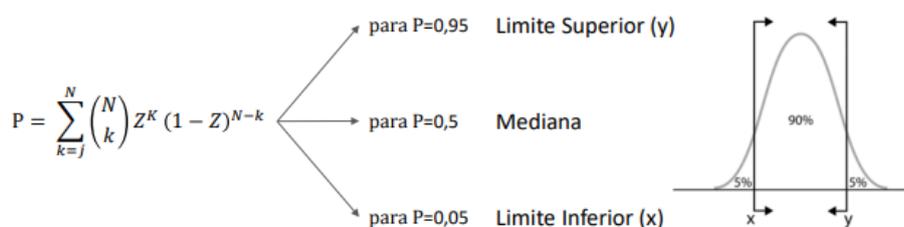


Figura 19. Metodología de Beta binomial (<https://www.reliawiki.com/>)

3. **Razón de la Verosimilitud (LR):** un tercer método para calcular los límites de la confianza es el método de los límites de la razón de máxima verosimilitud. Conceptualmente, este método es mucho más simple que el de la Matriz de Fischer, y se suele utilizar cuando el tamaño de la muestra es pequeño.

Por último, los límites de confianza tienen una última subdivisión dependiendo del enfoque para el cálculo de los mismos:

- **Límites de confianza del tiempo (Tipo 1):** son límites de la confianza alrededor del tiempo para una confiabilidad determinada.
- **Límites de confianza del tiempo (Tipo 2):** son límites de la confianza alrededor de la confiabilidad para un tiempo determinado.

En la práctica, se requieren programas propios de la elaboración de análisis de confiabilidad, para emplear la Matriz de Fisher o la Razón de la Verosimilitud, como métodos de cálculo. Para los desarrollos que se realizan en planillas de cálculo,

se emplea el método Beta Binomial, el cual brinda una apropiada aproximación utilizando una matemática más sencilla de ejecutar.

### **Paso 5: Transformar la confiabilidad en costos de mantenimiento.**

En este paso se pretende utilizar todos los conocimientos, obtenidos en las etapas anteriores, para establecer cuáles son las acciones adecuadas para abordar las fallas de los componentes en función de los costos involucrados.

De las acciones posibles que se pueden adoptar para solventar las detenciones recurrentes que sufre el equipo, según (Mora, 2009), se tiene:

#### **1. Mantenimiento correctivo**

Son las reparaciones o ajustes de un equipo, con intención de recuperar su funcionalidad, ya sea devolviendo a sus condiciones de funcionamiento estándar o no. Exige, para su eficacia, una buena y rápida reacción de la reparación (recursos humanos asignados, herramientas, repuestos, elementos de transporte, entre otros). La reparación propiamente dicha es rápida y sencilla, así como su control y puesta en marcha.

El gran problema de este tipo de mantenimiento es, principalmente, tener los recursos disponibles para actuar en el momento que ocurra la falla, desaprovechando el tiempo de operación del equipo. Además, en la mayoría de las empresas, los operarios no son expertos en las fallas de los equipos. Esto produce que el trabajador no logre transmitir, a la cuadrilla de mantenimiento, la situación de la máquina previa a su detención y la posible causa de falla, cuestiones requeridas para intentar reducir el tiempo de la reparación y lograr una rápida puesta en marcha.

#### **2. Mantenimiento modificativo**

Las acciones modificativas de mantenimiento intentan eliminar las causas de las fallas. Dichas acciones consisten en mejorar el diseño de los equipos, ya sea por envejecimiento o por obsolescencia tecnológica, llevando adelante modificaciones que permitan una mayor vida útil y/o una mejor productividad de los bienes que produce.

---

Es un tipo de mantenimiento correctivo que se aplica cuando ocurren reiteradas fallas por las mismas causas. En muchas ocasiones esta acción lleva a una gran cantidad de reemplazos de componentes por coincidencia de fallas, que luego no solventan el problema. Se asocia a una mala costumbre que suelen tener los equipos de mantenimiento.

### 3. **Mantenimiento preventivo**

Son acciones periódicas programadas de reparación o sustitución con la intención de prevenir que tanto el equipo como sus componentes fallen. De esta forma se logran detectar condiciones o estados inadecuados de los elementos, que puedan ocasionar tanto paros de producción como daños graves en los equipos o instalaciones. Sus principales ventajas, frente a otros tipos de tareas de mantenimiento, son:

- Evita averías mayores como consecuencia de pequeñas fallas.
- Prepara las herramientas y repuestos.
- Permite realizar las reparaciones en el momento más oportuno tanto para producción como para mantenimiento.
- Distribuye el trabajo de mantenimiento optimizando la cuadrilla de reparación.
- Disminuye la frecuencia de los paros, pero los aprovecha para realizar varias reparaciones diferentes al mismo tiempo.

Entre las tareas que más se destacan tenemos:

- a) **Tareas de servicio:** son tareas programadas con cierta periodicidad, que disminuyen la probabilidad de aparición de fallas por causas comunes.
  - b) **Tareas de sustitución:** son tareas programadas con cierta periodicidad, que mediante la sustitución de ciertos componentes del equipo, se logre la prevención de algunos modos de falla y el aumento de la vida útil del equipo. Estas pueden ser ejecutadas de dos formas:
-

- **Mantenimiento preventivo sistemático:** basa la periodicidad de sus intervenciones en el tiempo de operación del activo. Es decir, se establecerá un tiempo de uso y sustitución de cada componente, enfocados en la vida útil que suministra el proveedor del mismo.
- **Mantenimiento preventivo condicional:** la periodicidad se basa en las condiciones de desgaste de cada componente, logrando maximizar la vida útil del ítem y optimizar los costos de mantenimiento.

La función principal del mantenimiento preventivo es conocer el estado actual de los equipos, mediante los registros de control llevados en cada uno de ellos, y en coordinación con el departamento de programación, para realizar la tarea preventiva en el momento más oportuno. Consiste en una serie de actuaciones sistemáticas en las que desmontan las máquinas y se observan para reparar o sustituir los elementos sometidos a desgaste.

#### 4. **Mantenimiento predictivo**

El mantenimiento predictivo estudia la evolución temporal de ciertos parámetros para asociarlos a la ocurrencia de fallas, con el fin de determinar en qué período de tiempo esa situación va a generar escenarios fuera de los estándares, para planificar todas las tareas proactivas con tiempo suficiente, para que esa avería no cause consecuencias graves ni genere paradas imprevistas de equipos.

Para emplear este tipo de mantenimiento, es necesario monitorear las distintas variables físicas que permitan observar los posibles modos de falla de los equipos, de forma periódica o continua. A su vez, se pueden utilizar instrumentos comunes de medición ya instalados, o maquinarias específicas para la medición de variables puntuales. Se destacan dentro de las técnicas usualmente utilizadas:

- Análisis de vibraciones.
  - Análisis de aceite.
  - Termografía.
  - Radiografía.
  - Ultrasonido.
-

Todos estas técnicas se aplican en sus condiciones normales de funcionamiento, por lo que brinda una gran ventaja, al permitir realizar en la mayoría de los casos el mantenimiento predictivo sin detener la producción.

Existe una idea errónea en la comprensión de los distintos tipos de mantenimiento, tomando a las acciones no planeadas como desaciertos, y las acciones planeadas como lo correcto en todos los casos. Cada uno de los mantenimientos descriptos anteriormente cumplen una función y se desarrollan para condiciones específicas de instalaciones (equipos y componentes), operación y recursos que la empresa disponga.

Por ejemplo, para equipos que puedan afectar a la seguridad o medio ambiente, y pueda causar daños graves en el equipo, será preferente adoptar un mantenimiento proactivo, ya sea preventivo o predictivo. En cambio, si la falla de determinado componente no afecta a la seguridad y medio ambiente, si los costos de mantenimiento preventivo no son menores que los correctivos, y si no existe ninguna tarea programada que sea útil, la opción de emplear un mantenimiento correctivo será el indicado.

### **Condiciones de selección del tipo de mantenimiento**

Para determinar qué tipo de mantenimiento se debe emplear para cada componente estudiado, durante el análisis de confiabilidad previamente realizado, se utilizan dos condiciones:

1. **Tasa de falla:** como se explicó anteriormente, la forma de la curva de la tasa de falla brinda información vital sobre el modo de falla de los componentes, permitiendo establecer cuál es el mantenimiento óptimo.
    - a) **Tasa de falla decreciente:** implica falla prematura del componente, ocasionada por problemas en el control de calidad de la fabricación, del mantenimiento o del diseño.
    - b) **Tasa de falla constante y aleatoria:** contempla fallas aleatorias de los componentes, es decir, que estas ocurren independiente del tiempo. Esto produce que la ejecución de tareas de mantenimiento proactivo sea imposible. Por lo que se opta utilizar mantenimiento correctivo adrede en estos casos.
-

c) **Tasa de falla creciente:** proporciona información determinante para predecir el comportamiento de los componentes, de forma de poder establecer acciones preventivas y predictivas. Las fallas de los componentes son causadas por desgaste o degradación.

2. **Costos de los mantenimiento:** Como segunda condición, se deben conocer los costos de cada tipo de mantenimiento, y relacionarlos con los recursos que tenga la empresa.

Para obtener los costos para el mantenimiento preventivo, se consideran las siguientes variables:

- a) **Mano de Obra:** costos relacionados con las horas de trabajo de la cuadrilla de mantenimiento. Al ser una acción programada, el personal estará disponible.
- b) **Pieza:** valor de la pieza a sustituir o reparar, con el beneficio que, al ser una acción programada, se encuentre disponible en el almacén.
- c) **Lucro Cesante:** costo provocado por el tiempo en que el equipo queda detenido. Normalmente, en las acciones programadas, no se contabiliza como lucro cesante al poder emplear equipos en reserva por los momentos en que el equipo no se encuentra en servicio.

De los costos para el mantenimiento correctivo, se desglosan las siguientes variables:

- a) **Mano de Obra:** costos relacionados con las horas de trabajo de la cuadrilla de mantenimiento, que en muchas ocasiones son llamados de emergencia para poner el equipo en marcha lo antes posible.
  - b) **Pieza:** valor de la pieza a sustituir o reparar, sumado a que, si es una falla catastrófica otros componentes deberán ser reemplazados.
  - c) **Lucro Cesante:** costos asociado a la producción perdida en tiempo en que el equipo se mantuvo detenido. Este concepto, para el ambiente del petróleo, es comúnmente conocido como *Downtime*.
-

- d) **Atraso Logístico del Equipo:** costos debido al tiempo adicional que tarda la cuadrilla de mantenimiento para llegar a las instalaciones de trabajo, cuando la falla ocurre de forma inesperada. Por ejemplo, el equipo de mantenimiento suele estar en el yacimiento, pero cuando la falla ocurre fuera del horario de trabajo, se contempla el tiempo de traslado completo.
- e) **Atraso Logístico de la Pieza:** costo debido a la dificultad de adquirir un repuesto que no se encuentre en el almacén, asociado por sobre todo con el método de envío o un mayor valor del ítem aplicado por el proveedor para una rápida obtención.
- f) **Seguridad:** costos que se proponen por el riesgo de la seguridad del operario, patrimonial, ambiental y personal.

Entonces, si se cumple que, tanto la condición de que la tasa de falla sea creciente, como que los costos del mantenimiento preventivo sean menores que los correctivos, la aplicación de un mantenimiento preventivo podrá ser una opción en la estrategia de mantención.

El objetivo de un buen programa de mantenimiento preventivo es minimizar los costos generales, el tiempo de inactividad y/o cumplir con un objetivo de confiabilidad. Para lograr esto, se debe determinar un intervalo (tiempo) apropiado para el mantenimiento programado. Una forma de hacerlo es utilizar el modelo de reemplazo de edad óptimo (<https://www.reliawiki.com/>).

El tiempo de sustitución óptimo del componente se obtiene al minimizar el costo por unidad de tiempo (CPUT(t)). Este es equivalente a la relación de los costos totales esperados durante la vida operacional del activo, y las expectativas de vida del activo (9).

$$CPUT(t) = \frac{C_{MP} \cdot R(t) + C_{MC} \cdot F(t)}{\int_0^t R(t) dt} \quad (9)$$

Donde:

- $C_{MP}$  = Costo total para la sustitución preventiva.
- $C_{MC}$  = Costo total para la mantención correctiva.

En la Figura 20, se puede apreciar como el tiempo óptimo de reemplazo es el punto de equilibrio entre los costos del mantenimiento preventivo, que disminuyen con el aumento del tiempo, y los del mantenimiento correctivo, que se incrementan con el paso del tiempo. Este comportamiento se relaciona con que, al transcurrir un mayor tiempo de funcionamiento, la tasa de falla se incrementa hasta un punto en el cual es más probable que el ítem falle.

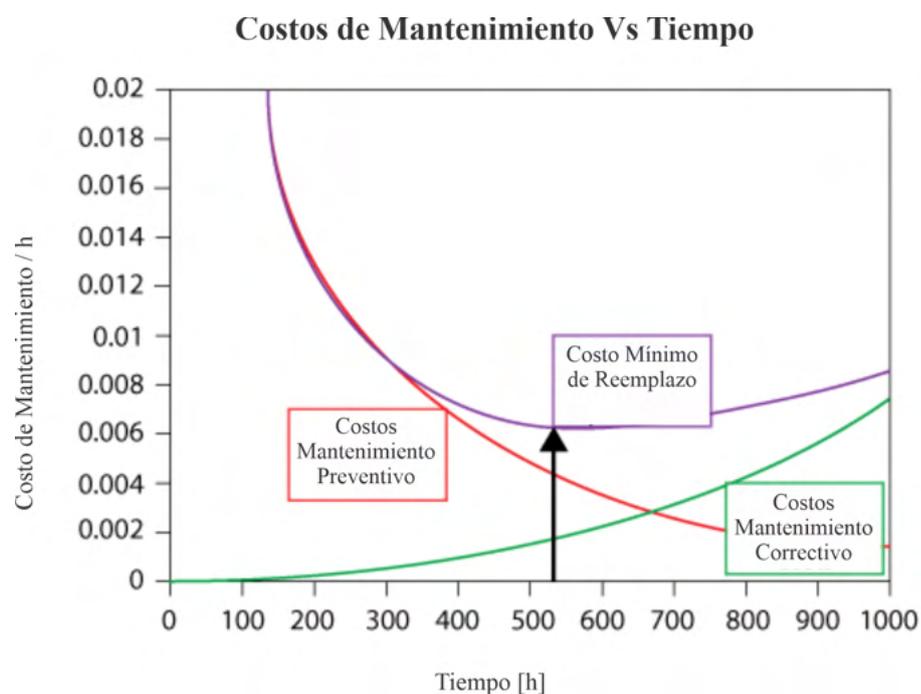


Figura 20. Intervalo óptimo de sustitución preventiva (<https://www.reliawiki.com/>).

### 3.3.5. Acciones de mejora

En esta última etapa, se plantean y desarrollan en detalle las alternativas de solución para las fallas previamente identificadas. Tiene como objetivo proporcionar el mayor beneficio económico y producir una mejora sustancial en los índices que controlan la disponibilidad de los equipos.

Además, se debe recopilar información sobre la aplicación de alguna de las propuestas, con el objetivo de describir y analizar los resultados obtenidos.

## 4. DESARROLLO

A continuación, se presenta el desarrollo de la metodología propuesta aplicada a los equipos motocompresores de las plantas compresoras analizadas.

### 4.1. Análisis de Falla

Como primer paso de este análisis, se inicia con la recopilación de los datos del historial de fallas de todos los equipos motocompresores de las 3 (tres) plantas compresoras principales que posee “La Empresa”. Se dispone con una gran cantidad de información, la cual permite visualizar el comportamiento de los equipos a lo largo del año 2019, bajo las condiciones de funcionamiento de la empresa en la zona de Neuquén.

Utilizando la herramienta estadística del Diagrama de Pareto, se busca establecer el 20 % de las detenciones no programadas que ocasionan el 80 % de las fallas totales, y de esta manera, direccionar el análisis de fallas a los componentes involucrado en estos defectos. En la Figura 21 se muestra los resultados obtenidos del Diagrama de Pareto:

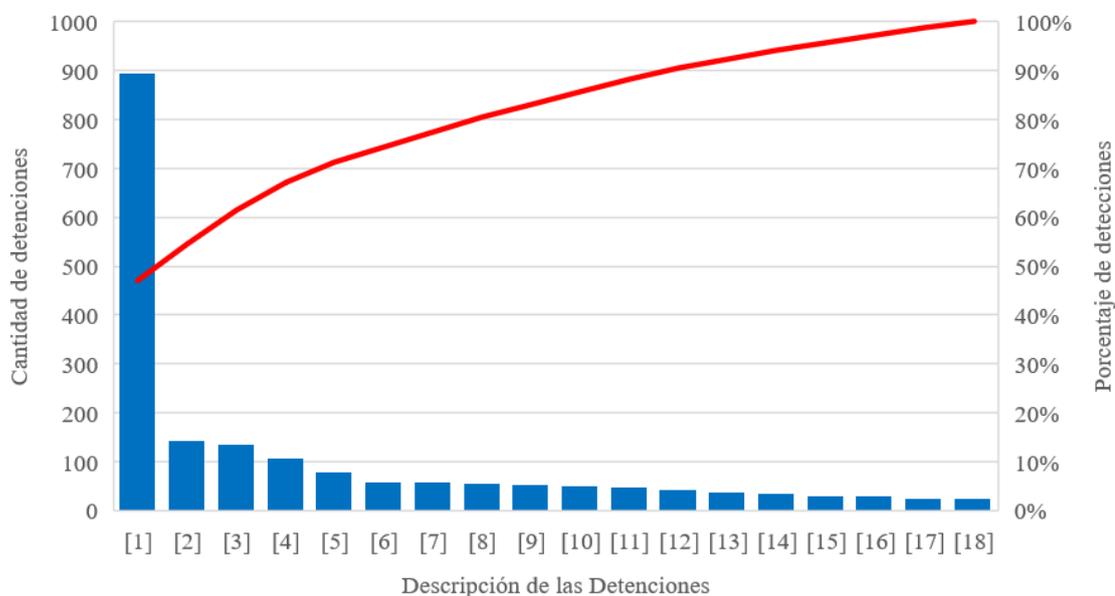


Figura 21. Diagrama de Pareto de detenciones registradas durante el año 2019.

Como se observa en la Tabla 2, las fallas más recurrentes se asocian a:

- Desvío de temperatura del cilindro motor, con un 47 % del total de las fallas, produciendo 895 paros y un tiempo total de paro de 649,6 h.

- Alta temperatura del cilindro compresor, con un 7,5 % del total de las fallas, generando 143 paros y un tiempo total de paro de 517,2 h.
- ESM *SHUTDOWN*, con un 7,1 % del total de las fallas, ocasionando 135 paros con un tiempo total de paro de 270,3 h.

Tabla 2. Pareto de detenciones 2019

Den.	Descripción de las detenciones	Cantidad de fallas	Suma del tiempo de parada [h]	Promedio del tiempo de parada [h/cant.]	Sector responsable
[1]	Desvío de temperatura cilindro motor	895	649,6	0,7	Mantenimiento-Operación
[2]	Alta temperatura cilindro compresor	143	517,2	3,6	Mantenimiento-Operación
[3]	ESM SHUTDOWN	135	270,3	2	Operación
[4]	Bajo nivel de aceite de compresor	108	37,9	0,4	Operación
[5]	Alta temperatura de refrigerante	78	15,5	0,2	Operación
[6]	Altas vibraciones del Cooler	59	14,2	0,2	Operación
[7]	Baja presión de aceite Motor	58	82,4	1,4	Operación
[8]	Sobrecarga	56	20,6	0,4	Mantenimiento-Operación
[9]	Desvío de temperatura cojinetes principales del motor	52	177,9	3,4	Operación
[10]	Bajo nivel de aceite compresor	50	54,5	1,1	Operación
[11]	Mantenimiento preventivo	47	272	5,8	Mantenimiento
[12]	Altas vibraciones del motor	42	51,8	1,2	Operación
[13]	Baja presión de aceite compresor	37	49,3	1,3	Operación
[14]	Lube no flow	35	166,9	4,8	Mantenimiento-Operación
[15]	Falla de carburación	30	50,5	1,7	Mantenimiento
[16]	Mantenimiento TOP END	29	1610,9	55,5	Mantenimiento
[17]	Bajo nivel de agua en camisa motor	26	19,7	0,8	Operación
[18]	Falla en cilindro motor	25	93,9	3,8	Mantenimiento

Para una mayor comprensión de las detenciones no programadas con mayor frecuencia, a continuación, se describen cada una de estas:

- **Detenciones por desvío de temperatura del cilindro motor:** son detenciones automáticas detectadas por el sistema de protección del equipo; se generan cuando la temperatura de uno de los cilindros del motor se desvía 150°C de la temperatura media entre todos los cilindros.

Se destacan dos tipos de comportamiento:

1. Una gran cantidad de las detenciones se deben a micro-paros de 10 a 20 minutos. Estos se corresponden con paros operacionales, donde el tiempo de detención coincide con la demora que tiene el operador entre el trayecto de la oficina hasta el motocompresor, para colocarlo nuevamente en funcionamiento.
2. Un segundo porcentaje de las detenciones muestra repetidas fallas en un mismo cilindro, que conllevan a la intervención de cuadrilla de mantenimiento

mecánico e instrumentista. La mayoría de estas situaciones vienen acompañados de reemplazos innecesarios de bujías de ignición del cilindro en falla, siendo que esta acción no suele solucionar el problema y la reincidencia de las detenciones continúa.

- **Detenciones por alta temperatura de cilindro compresor:** estas son detenciones que se producen de forma manual o de manera automática, dependiendo el modo de detección de la temperatura. En el primer caso, la cuadrilla de operaciones toma mediciones semanales con un termómetro infrarrojo en cada posición de las válvulas. Por otro lado, el sistema de protección censa la temperatura de los recipientes de succión y descarga de las distintas etapas, y actúa conforme a estos datos.

Para todos los casos en que se produce esta detención, la cuadrilla de mantenimiento mecánico interviene el equipo y realiza un cambio de válvulas del compresor.

- **Detenciones por ESM *Shutdown*:** corresponde a fallas aleatorias, que son resueltas con el reinicio del equipo. En estas situaciones, las cuadrillas de personal mecánico e instrumentación no intervienen la máquina.

Una vez determinadas las detenciones no programadas predominantes en los equipos motocompresores, es necesario conocer las causas de sus ocurrencias, los componentes que se encuentran involucrados, y las acciones correctivas y preventivas que suelen tomarse actualmente.

Para este siguiente paso, se recopila toda la información de motor Waukesha VHP L-7044 GSI y el compresor Ariel JKG/4 que brindan sus fabricantes. Los subsistemas y componentes de estos equipos fueron descritos previamente en el marco teórico. Focalizando la atención en las detenciones no programadas a analizar, se puede establecer:

En el caso de las detenciones por desvío de temperatura del cilindro motor, éstas pueden ser producida por la falla de distintos componentes pertenecientes a varios subsistemas, como lo son:

- a. Sistema de encendido.
  - b. Sistema de control de combustible.
-

- c. Sistema de distribución.
- d. Sistema turbocompresor.

La gran cantidad de ítems que pueden ser partícipes en la avería del equipo, es una de las principales complicaciones a la hora de determinar la causa raíz e intervenir el equipo de forma rápida y correcta.

En cambio, las detenciones por alta de temperatura cilindro compresor se relacionan, para cualquiera de sus modos de falla, en forma directa con la falla funcional de las válvulas del compresor. La decisión del paro del equipo, se realiza de forma manual por los operarios de la planta. Estos miden la temperatura de las válvulas, mediante un termómetro infrarrojo, y verifican que las temperaturas de servicio se ubiquen en el rango adecuado.

Con toda esta recopilación de información, y con el objetivo de establecer la causa raíz y sus posibles soluciones, para la falla y recambio de los principales componentes críticos de los equipos motocompresores analizados, se utiliza la metodología del Diagrama de Ishikawa o Diagrama Causa-Efecto. Para iniciar esta metodología es primordial describir correctamente los efectos de nuestro problema, con el fin de lograr detectar la causa raíz del mismo, y los modos de solucionarlos. En tal sentido se detectaron dos fenómenos, efectos, que se consideran relevantes:

- a. Número importante de detenciones no programadas por desvío de temperatura cilindro motor.
- b. Cantidad significativa de roturas de válvulas del compresor.

En el **Anexo II (B)** se desarrolla la metodología de los 5 porqués, permitiendo elaborar los diagramas de espina de pescado (ver Figuras [22](#) y [23](#)) en los cuales se exponen las causas raíz de los efectos que se buscan atenuar.

---

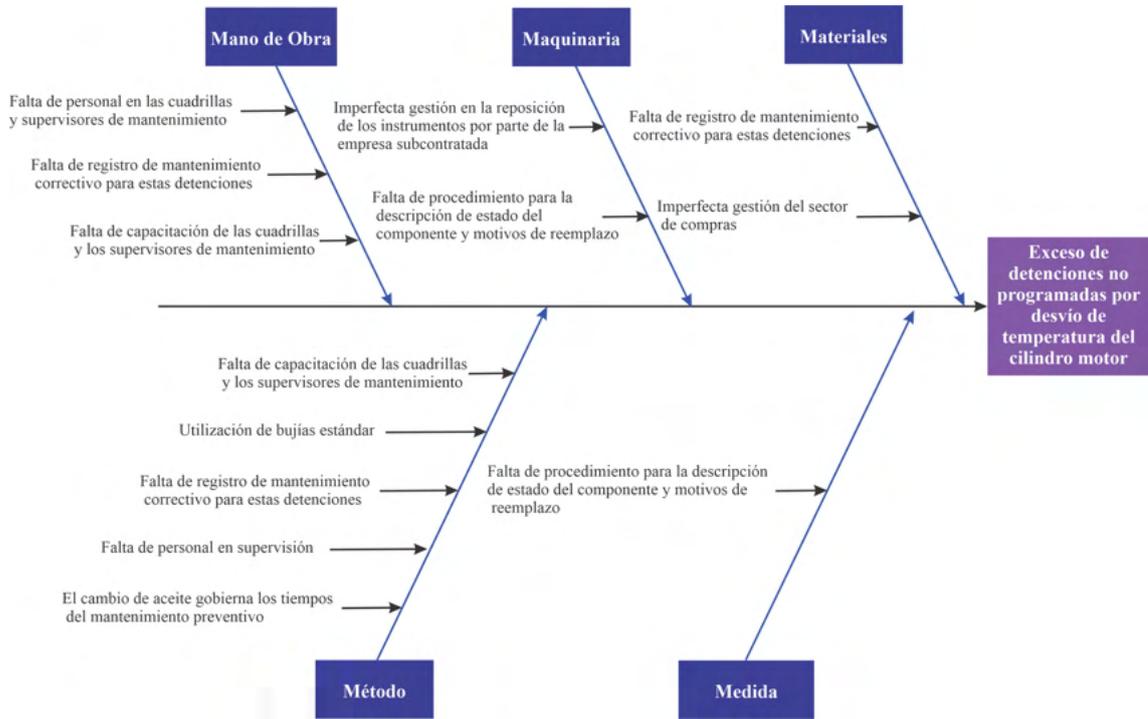


Figura 22. Diagrama de Ishikawa para un número importante de detenciones no programadas por desvío de temperatura del cilindro motor.

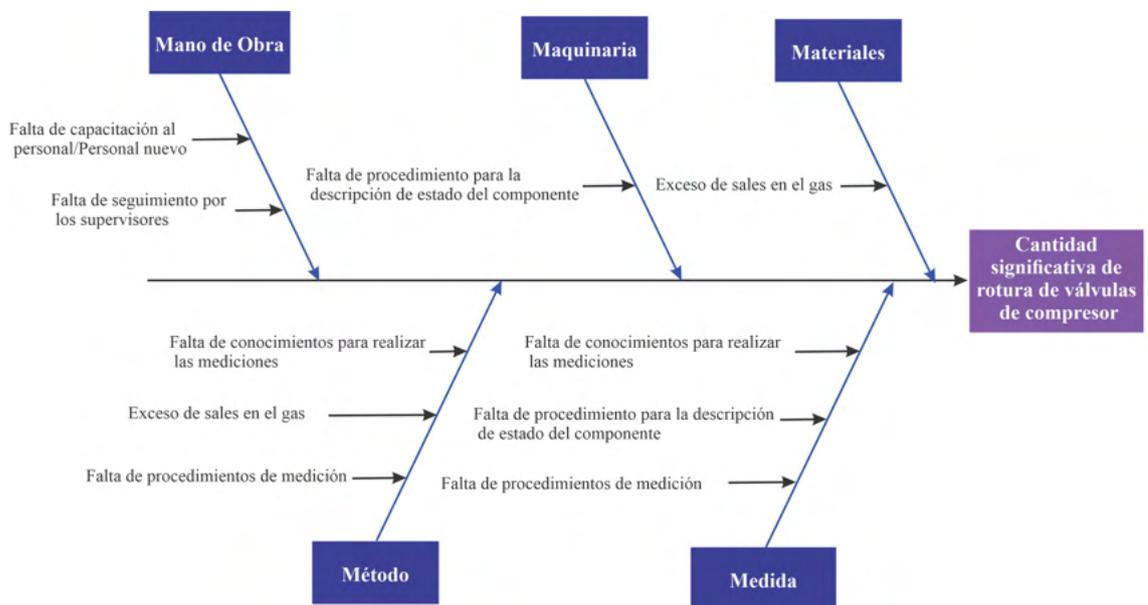


Figura 23. Diagrama de Ishikawa para un número importante de roturas de válvulas.

En las Tablas 3 y 4, se evalúan las posibles causas raíz y se las califica de forma cuantitativa, según la metodología desarrollada en la sección 3.3.3. A continuación, se presentan los principales emergentes para los dos casos analizados.

#### **Detenciones no programadas por desvío de temperatura cilindro motor:**

Para solventar este efecto, se recomienda establecer un registro de mantenimiento correctivo para las detenciones no programadas por desvío de temperatura del cilindro motor. De esta forma, el supervisor de mantenimiento podrá seguir una serie de pasos para establecer de forma rápida, utilizando la información de los parámetros en tiempo real, que componentes son los responsables del paro y las posibles causas del mismo.

Complementariamente, se pueden establecer los tiempos de recambios adecuados con una alta confiabilidad para evitar que las bujías fallen por desgaste. Esto se puede realizar mediante un análisis de datos de vida con los históricos de falla de años anteriores. Por el otro lado, existe la posibilidad de ensayar otro tipo de bujías que se adapten mejor a las condiciones de funcionamiento y las exigencias de carga que tienen estos motores.

#### **Roturas de válvulas de compresor:**

A partir del análisis previo, se puede deducir que si se logra solventar el problema del exceso de sales en el gas que ingresa al compresor, se obtendrá el mayor beneficio posible. Este es un problema que proviene directamente del sector de procesos. En este sentido, se debe establecer la razón por la cual estos sólidos no decantan completamente en el separador primario.

Por otro lado, es posible complementar la solución principal con un procedimiento de medición de gas, de forma tal de conocer sus condiciones en la succión del motocompresor con un monitoreo semanal. Otra opción, es buscar un mayor liderazgo por parte de los supervisores de operación, logrando que los operadores de campo inspeccionen el estado de los filtros de succión, con el objetivo de ayudar a predecir las condiciones de ingreso del gas, procurando que el filtro sea el que retenga las sales, sin llegar al cilindro.

---

Tabla 3. Criterios para evaluar las causas y soluciones de detenciones no programadas por desvío de temperatura motor.

N°	Causas	Solución	Criterio [1-3]						Totales
			Factor	Causa directa	Solución	Factible	Medible	Bajo costo	
1	Falta de registro de mantenimiento correctivo para estas detenciones	Establecer un registro de mantenimiento correctivo para las detenciones por desvío de temperatura de cilindro motor	3	3	2	3	3	3	17
2	Falta de capacitación de las cuadrillas y los supervisores de mantenimiento	Capacitar a las cuadrillas y los supervisores de mantenimiento	2	1	2	3	1	1	10
3	Falta de procedimiento para la descripción de estado del componente y motivos de reemplazo	Implementar Norma ISO-14224	1	2	2	3	1	3	12
4	Se utilizan bujías estándar	Probar otro tipo de bujías para mejorar el rendimiento	2	2	2	3	3	3	15
5	Falta de personal en supervisión	Contratar y capacitar personal para la supervisión de mantenimiento	1	1	1	2	1	1	7
6	El cambio de aceite gobierna los tiempos del mantenimiento preventivo	Establecer los tiempos de recambios adecuados para evitar utilizar bujías con exceso de desgaste	2	2	2	3	3	3	15
7	Falta de personal en las cuadrillas y supervisores de mantenimiento	Contratación de personal para estos puestos	1	1	1	2	1	1	7
8	Imperfecta gestión en la reposición de los instrumentos por parte de la empresa subcontratada	Exigir los instrumentos requeridos para el mantenimiento antes de ingresar a la planta	2	2	1	2	1	3	11
9	Imperfecta gestión del sector de compras	Mejorar la gestión de compras y respetar los stock mínimos de cada consumible	1	1	1	2	1	3	9

Tabla 4. Criterios para evaluar las causas y soluciones para la falla de válvulas de compresor.

Num.	Causas	Solución	Criterio [1-3]						Totales
			Factor	Causa directa	Solución	Factible	Medible	Bajo costo	
1	Falta de capacitación al personal/Personal nuevo	Capacitar al personal nuevo	2	1	1	3	1	1	9
2	Falta de seguimiento por los supervisores	Requerir a los supervisores de operación un mayor seguimiento de sus trabajadores	3	1	2	3	1	3	13
3	Falta de procedimiento de descripción del estado del componente	Establecer un procedimiento de descripción del estado de los componentes reemplazados	1	1	1	3	2	3	11
4	Exceso de sales en el gas	Modificar el proceso para lograr que las sales decanten en el separador primario	3	3	3	3	3	2	17
5	Falta de procedimiento de medición	Realizar un procedimiento de medición de gas	2	1	3	3	2	3	14
6	Falta de conocimientos para realizar la medición	Capacitar al personal de medición	1	1	1	3	1	1	8

## 4.2. Análisis de Datos de Vida (LDA)

Con el objetivo de implementar las eventuales soluciones planteadas y comprender el comportamiento de los componentes críticos, se realizó un LDA a partir del histórico de falla de cada elemento. A continuación, se detallan algunos aspectos que no se ven reflejados en los datos analizados:

- Existe un desconocimiento de los modos de falla de las bujías y las válvulas, solo se conocen sus tiempos de falla. Esto se debe a que la empresa no tiene recursos humanos y logísticos suficientes para realizar un análisis de falla para cada problema detectado.
- Los motocompresores trabajan entre condiciones de media y alta carga, dependiendo de la venta de gas de cada día. Esto modifica las condiciones de funcionamiento de las bujías y de las válvulas del compresor. Por esta razón se realizó el análisis para un rango de operación y no para condiciones fijas de velocidad y carga.
- El gas de venta a comprimir proveniente de los pozos varía su composición dependiendo de su procedencia y antigüedad. Este factor también es controlado por el sector de operaciones. El diseño de los separadores primarios al ingreso de la planta de compresión debería soportar esta variación y mantener un caudal con las mismas condiciones, pero en el escenario real se aprecia una variación en las condiciones del gas.

Teniendo en cuenta estos detalles en el desarrollo del análisis, se realizará el LDA para establecer una base inicial de la confiabilidad de los ítems, y de esta forma, poder establecer una relación entre los costos correctivos y preventivos. Para realizar el análisis planteado, y crear la curva de confiabilidad de cada elemento, a continuación, se seguirán los pasos definidos en el marco teórico:

### **Paso 1: Conocer qué tipo de datos se tiene**

En los dos casos bajo estudio, se utilizan variables aleatorias continuas y se definen los siguientes tipos de datos:

- **Datos completos:** elementos que dispone el intervalo completo de operación hasta la falla del componente crítico.
-

- **Datos censurados o suspendidos:** elementos designados para los intervalos donde el componente se cambió preventivamente en un mantenimiento, cuando no se aclara correctamente la posición exacta del ítem reemplazado, o cuando los tiempos de recambios no son confiables.
- **Datos censurados a la izquierda:** son datos suspendidos donde no se conoce el inicio de su funcionamiento. Estos se utilizan para dar comienzo al análisis y aprovechar el tiempo funcionamiento que los componentes registran.

En este primer paso del análisis, se recopila la información sobre el funcionamiento y falla de cada uno de los componentes críticos. Este paso es de vital importancia, debido a que la misma constituye la base sobre la que se realiza todo el análisis de confiabilidad. Se compilaron los datos históricos (desde el 01/01/2019 al 01/01/2020) utilizando los datos provenientes del sistema de información de la empresa. Con esta información se crea una planilla de cálculo con la siguiente información de cada componente:

- Motocompresor al que pertenece.
- Ubicación del ítem (N° de cilindro motor o N° de cilindro compresor).
- Fecha y hora de la falla.
- Tiempo entre fallas.
- Causa del reemplazo (falla o un mantenimiento preventivo).
- Cantidad de ítems reemplazados.

De los componentes críticos previamente designados (bujías de ignición y las válvulas de compresor), es conveniente desglosar el análisis de las válvulas de compresor para cada uno de los cilindros. Esto se debe a que las condiciones de funcionamiento (caudal, presión y temperatura) varían en las distintas etapas de compresión, en consecuencia, su vida útil también será diferente.

### **Paso 2: Designación del modelo de distribución a utilizar.**

Para modelar matemáticamente el comportamiento de vida de los componentes críticos es necesario seleccionar un modelo de distribución acorde con su forma de falla.

---

Para ello, se utiliza la distribución Weibull, que debido a su forma general de tres parámetros ofrece una gran flexibilidad permitiendo obtener el mejor ajuste para los posibles comportamientos de estos elementos.

**Paso 3: Definir el método de estimación de parámetros.**

En este paso es necesario realizar la diferenciación entre los métodos que se utilizaron para las bujías de ignición y para las válvulas del compresor. Para el análisis de las bujías, se contabiliza una cantidad de 35 datos completos y 582 datos suspendidos. Con esta gran cantidad de datos censurados y una distribución no homogénea de los elementos completos, el método de estimación que más se adapta a esta condición es el modelo de máxima verosimilitud (MLE). Por otro lado, para las válvulas del compresor se obtuvieron 17 datos completos y 28 datos censurados. Al tener una baja cantidad de elementos completos, y una cantidad equilibrada entre ambos tipos de datos, se opta por utilizar el modelo de ploteo de probabilidades con una modificación en el número de orden, que altera los valores del *Ranking Mediano* con la Aproximación de Bernard.

**Paso 4: Realizar los cálculos y gráficos para el análisis de confiabilidad.**

Luego de recopilar y seleccionar los datos útiles para el análisis, se desarrollaron los cálculos y gráficos que se emplean en el LDA. Para ello, se utilizaron dos herramientas para realizar el análisis: planillas de cálculo (Excel) y un software específico de confiabilidad provisto por la Empresa (<https://www.reliasoft.com/>). De esta forma se obtuvieron los parámetros de forma ( $\beta$ ) y escala ( $\eta$ ) de la distribución Weibull, los gráficos de confiabilidad, tasa de falla y PDF, tanto para Bujías como para Válvulas. El único limitante al momento de utilizar las planillas de cálculo se refleja en el método para la estimación de los límites de confianza, dado que solo permite utilizar el modelo de Beta Binomial para el desarrollo.

A partir del desarrollo alcanzado, solo es necesario cargar en una hoja de cálculo los datos completos y censurados, y posteriormente, seleccionar el modelo de distribución, los métodos de estimación de parámetros y el método para determinar los límites de confianza. A raíz de que no es necesario utilizar una estimación de parámetros no lineal, y que los dos componentes pueden ser representados por el modelo de distribución Weibull, se obtuvieron resultados similares con ambas herramientas. A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

---

## 1. Bujías de Ignición:

En la tabla 5, se presentan los parámetros obtenidos a partir de un conjunto de datos recolectados y seleccionados de los 15 motores Waukesha. Se observa que las bujías tienen un comportamiento con una tendencia a una distribución normal, donde la tasa de falla es creciente y el modo de falla que lo acompaña es por desgaste. Además, se tiene que el 63,2 % de la población fallará en un tiempo de 7688,7 h.

Como se observa en las Figuras 24 a 26, las bujías tienen una confiabilidad de 95 % para 2753 h de operación, con un límite de confianza bilateral del 90 %, siendo 2522 y 3260 h los límites inferior y superior respectivamente.

Tabla 5. Parámetros para las bujías motor.

Distribución	Weibull 2P
Análisis	MLE
Método LC	LRB
Ranking	MED
Beta ( $\beta$ )	3,04
Eta ( $\eta$ ) [h]	7688,7
MTTF [h]	6870
Conf. MTTF (%)	49 %
Falla/Suspensión	35 \ 582

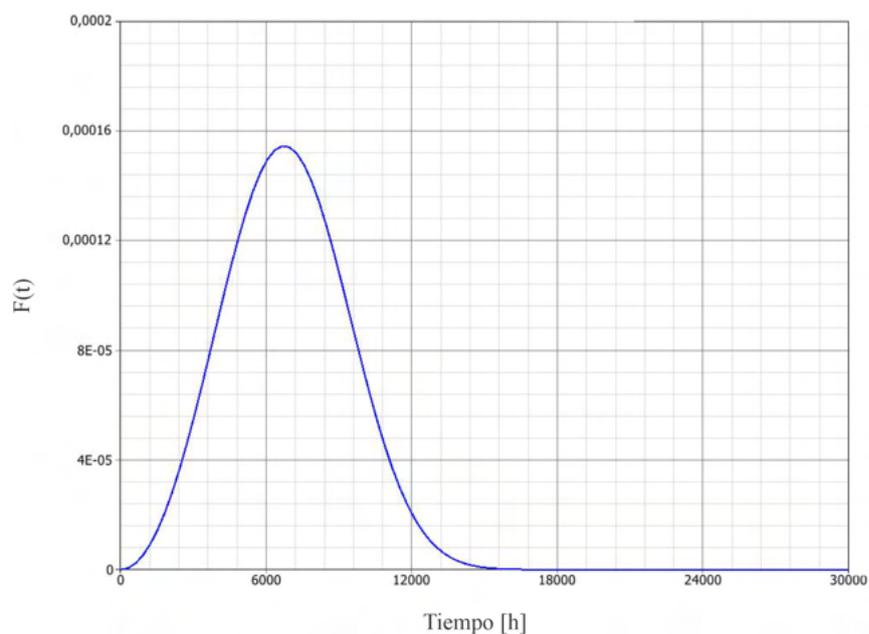


Figura 24. Función de densidad de probabilidad para las bujías de ignición.

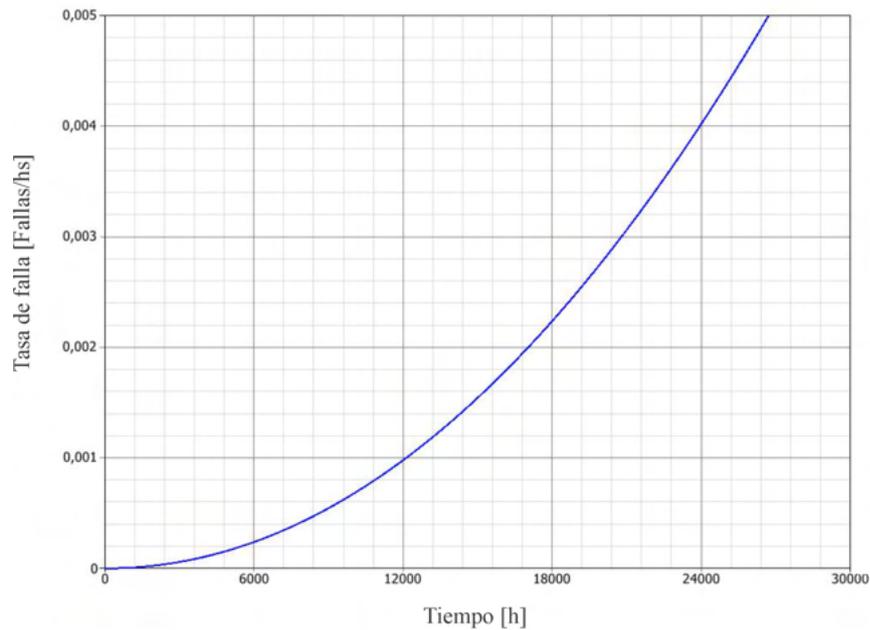


Figura 25. Tasa de falla para las bujías de ignición.

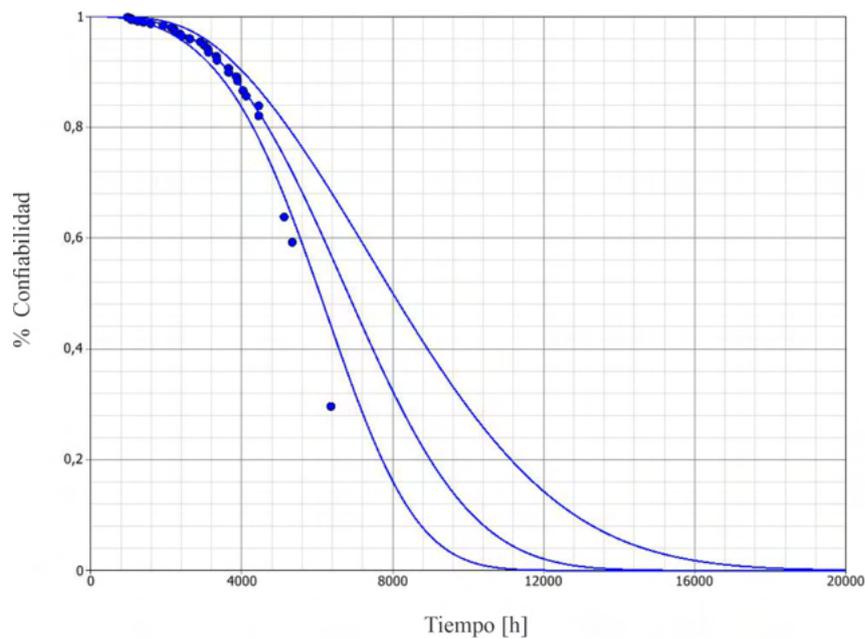


Figura 26. Función de confiabilidad para las bujías de ignición.

## 2. Válvulas del Compresor:

En este caso, para determinar los parámetros, se dividieron los datos recopilados en las posiciones de las válvulas afectadas, contemplando: número de cilindro, función de la válvula (succión o descarga) y lado de compresión (Cigüeñal [CE] o Cabeza [HE]). De esta manera, se permite visualizar que los componentes más afectados son los del cilindro N°1 y N°3 (lado cigüeñal), cumpliendo con la cantidad mínima

de datos requerida para realizar el análisis. En la Tabla 6 se muestran los parámetros obtenidos para las dos posiciones de las válvulas.

Tabla 6. Parámetros para las válvulas del compresor.

CIL. 1, Descarga CE		CIL. 3, Descarga CE	
Distribución	Weibull 2P	Distribución	Weibull 2P
Análisis	RRX	Análisis	RRX
Ranking	MED	Ranking	MED
Beta ( $\beta$ )	1,12	Beta ( $\beta$ )	1
Eta ( $\eta$ ) [h]	6422	Eta ( $\eta$ ) [h]	11136
Rho	0,99	Rho	0,93
Rho2	0,98	Rho2	0,87
MTTF [h]	6154	MTTF [h]	11160
Conf. MTTF (%)	39 %	Conf. MTTF (%)	37 %
Falla-Susp.	16 - 45	Falla-Susp.	14 - 41

En las Figuras 27 a 29, se puede observar que ambas válvulas tienen un parámetro de forma ( $\beta$ ) próximo a 1 (uno), y tienen una discrepancia de casi el doble en el parámetro de escala ( $\eta$ ). Esto se traduce en que la ocurrencia de las fallas de las válvulas de compresor se produce de forma aleatoria durante su funcionamiento.

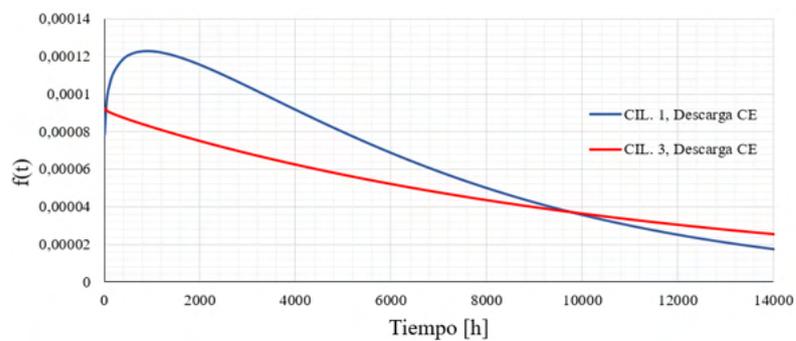


Figura 27. Función de densidad de probabilidad para ambas válvulas de compresor

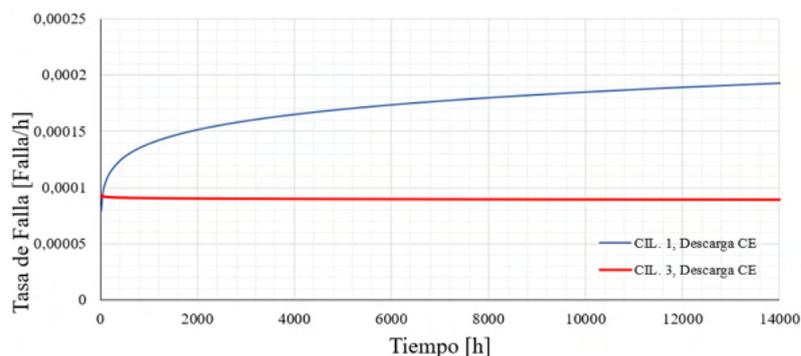


Figura 28. Tasa de falla para ambas válvulas de compresor

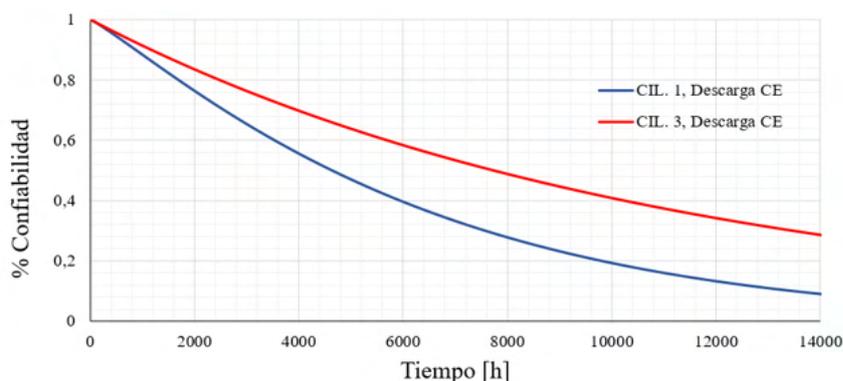


Figura 29. Función de confiabilidad para ambas válvulas de compresor

### Paso 5: Transformar la confiabilidad en costos de mantenimiento.

A partir del comportamiento de la tasa de falla de los componentes críticos se dota al responsable de mantenimiento de herramientas necesarias para conocer la manera adecuada de accionar frente a las diversas tareas y tipos de mantenimiento.

En este sentido, en primer lugar, en el caso de las bujías de ignición con tasa de falla creciente, es posible emplear mantenimiento proactivo si los costos asociados no son mayores a los costos correctivos. Por otro lado, es apropiado destacar que, a diferencia de otras actividades, para las compañías enfocadas en la extracción y producción de gas y petróleo, los costos relacionados al lucro cesante son de gran relevancia. Esto se debe a que el precio de los productos no renovables se traduce como *downtime*. Para establecer el equivalente de producción de gas en *USD*, la Empresa utiliza la siguiente información:

- Capacidad de producción por motocompresor de 200 km<sup>3</sup> de gas por día.
- Tiempo promedio de reparación de 3 h, en el cual se consideran el transporte de Neuquén hasta las plantas compresoras y el tiempo de reparación de la cuadrilla.
- Valor de USD 17.000 para la producción de 100 m<sup>3</sup> de gas.

A partir de esto, se obtiene un *downtime* de USD 4.250 asociado al equipo por cambio de bujía. Además, el valor de una bujía es de USD 30. Este precio es lo que se tendrá en cuenta para un mantenimiento correctivo, en cambio, para un mantenimiento preventivo es necesario cambiar las 12 bujías que se encuentran en el motor, llevando al precio total de los ítems a USD 360.

En cuanto al costo de mano de obra, será similar para ambos casos donde la disposición de la cuadrilla de mantenimiento será de la mitad de sus horas de trabajo para completar la puesta en marcha del equipo. Actualmente, un día de trabajo corresponde a USD 402, por lo que se estimará el costo de mano de obra en USD 201.

Por último, los costos asociados al atraso logístico del equipo y pieza, y los costos por seguridad, no son representativos para este componente. Por este motivo se decide no utilizarlos.

A partir de los valores detallados, se calcula el total de los costos para cada tipo mantenimiento, obteniendo así un total de USD 4.481 para los costos de mantenimiento correctivo y un valor de USD 561 para los costos de mantenimiento preventivo.

De esta forma, se cumple la segunda condición y los costos preventivos son menores a los correctivos, permitiendo el cálculo del tiempo óptimo para establecer el mantenimiento preventivo.

Como se observa en la Figura 30, se establece un tiempo óptimo de 3.200 h para realizar el mantenimiento preventivo. Este valor ayuda a reforzar el tiempo actual del mantenimiento preventivo, el cual se realiza cada 3.000 h, establecido por el fabricante y otros componentes del motor que requieren una sustitución en este tiempo.

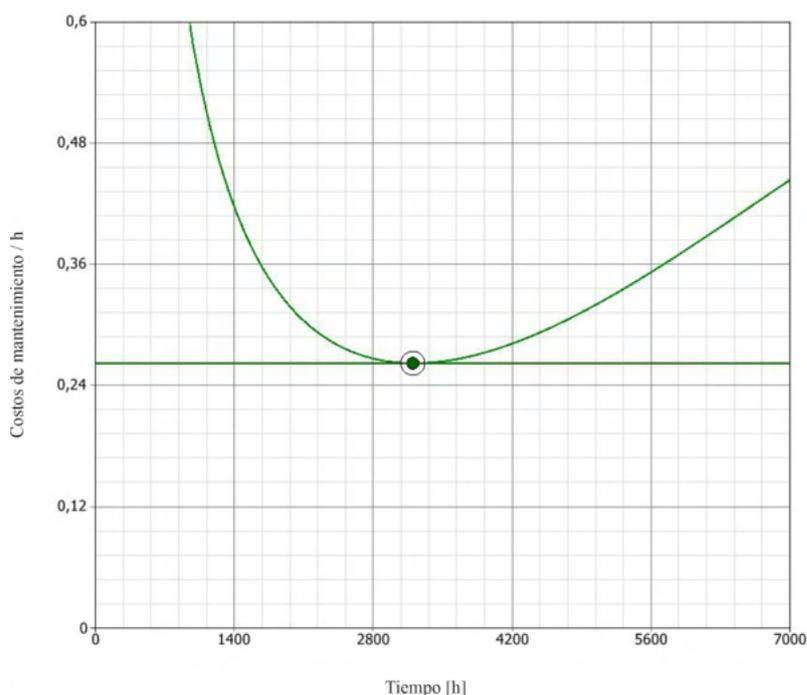


Figura 30. Tiempo óptimo para mantenimiento preventivo

Por otro lado, para las válvulas de compresor, no se puede aplicar la metodología propuesta dado que la tasa de falla obtenida es constante. Por lo tanto, se plantean dos posibles opciones: rediseñar las válvulas de descarga, o bien, dejar que fallen y seguir utilizando el mantenimiento correctivo como opción.

### **4.3. Acciones de mejora**

#### **Detención por desvío de temperatura cilindro motor**

Fundamentado en los emergentes que surgieron del análisis de fallas, se plantean tres recomendaciones que se deberían ejecutar para conseguir una mejora sustancial en la disminución de las detenciones no programadas por desvío de temperatura de cilindro motor:

##### **A. Registro de mantenimiento correctivo para detenciones por desvío de temperatura de cilindro motor**

La creación de un registro de mantenimiento correctivo para las detenciones no programadas por desvío de temperatura de cilindro motor es la opción que obtuvo mayor valoración a la hora de establecer las causas y soluciones raíz del problema. El objetivo de este documento es guiar a los supervisores de mantenimiento para la detección de la causa y componentes que generan el paro del equipo. Además, este permite estimular a los trabajadores a utilizar la información en tiempo real y recopilada en el tiempo, de los distintos parámetros del motor, para desarrollar la acción adecuada y optimizar los recursos del sector.

Para realizar este registro se deben considerar los distintos parámetros que manifiestan las condiciones de funcionamiento del motor Waukesha, a partir del conjunto de instrumentos incorporados en él. Estos son visibles en tiempo real desde el panel de control (HMI) ubicado sobre el equipo, y a distancia de forma *online* transmitido por el SCADA. Además, este último posibilita el monitoreo de los parámetros a través del tiempo, herramienta que ayuda a focalizar el mantenimiento en los componentes y mecanismos de falla que puedan ser responsables.

Las variables que ayudan a los supervisores y contribuyen en la detección de las causas de la detención no programada por desvío de temperatura de cilindro motor

---

---

son, principalmente:

- a) **RPM y % de carga:** estos parámetros ubican en contexto el estado de funcionamiento del equipo previo a su detención. La variación de la velocidad o de la carga del motor afectará directamente todas las demás variables.
- b) **Temperatura de cada cilindro motor:** brinda la indicación de temperatura de cada cilindro mediante una termocupla ubicada a la salida. Existe una diferencia de temperatura entre los cilindros dependiendo su ubicación en el motor. Cuando la señal de uno de los cilindros se desvía 150°C (300°F) de la media de temperatura, el motor se detiene.
- c) **Temperatura a la entrada del turbocompresor banco izquierdo (LB) y derecho (RB):** este parámetro provee las temperaturas tomadas al ingreso de cada turbocompresor, siendo un valor medio entre las temperaturas de los cilindros de cada banco.
- d) **Spark Reference Number (SRN):** parámetro que permite estudiar el comportamiento de la bujía a lo largo del tiempo, estimar el tiempo de funcionamiento restante hasta su posible desgaste o percibir si algún otro factor o compuesto externo esté afectando su funcionamiento (GECó, 2017).

Con toda esta información, se propone en el Anexo III (C) un diagrama de flujo básico de toma de decisiones para actuar ante cada detención no programada, de forma tal que el supervisor basándose en las variables en tiempo real y sus tendencias, pueda determinar la posible causa sin necesidad de intervenir y desarmar el equipo.

## B. Tiempo de acción preventiva de las bujías estándares

Previamente se desarrolló el análisis de datos de vida de las bujías, del cual se parte de la recolección de los datos de falla hasta llegar a determinar la confiabilidad del ítem y establecer un tiempo óptimo de reemplazo preventivo del componente, siendo este de 3200 h. A partir de este, se logró corroborar que el tiempo actual entre mantenimientos preventivos, el cual se realiza cada 3000 h, definido por el fabricante y por el tiempo que el de vida del aceite, es el pertinente.

---

Con los conocimientos adquiridos, se puede suponer que si el mantenimiento preventivo se respeta, las bujías no deberían fallar por desgaste. Por otro lado, mediante el seguimiento periódico del *Spark Reference Number (SRN)*, se puede estudiar el comportamiento de la bujía a lo largo del tiempo y actuar de forma predictiva si se lo necesita, ya sea que algún otro factor o compuesto externo actúe sobre la bujía comprometiendo su funcionamiento.

### C. Ensayo de bujías alternativas

Como última recomendación, para mejorar y disminuir las detenciones no programadas por desvío de temperatura de cilindro motor, se propone la utilización de bujías de ignición con mayor rendimiento para altas condiciones de funcionamiento. Siendo posible que las actuales bujías *Champion 60999Z* no soporten la exigencia de la operación.

Con este propósito, se comenzó a evaluar la utilización de nuevas tecnologías que reemplacen el uso de las bujías estándar. Como primera opción, se iniciaron una serie de pruebas con las bujías *Bosch 7305*. Este modelo, cuenta con electrodos de inserto de iridio de 2.4 mm, los cuales según el fabricante aumentan de forma considerable la vida útil de la bujía. Además, el metal precioso proyectado mejora el acceso a la mezcla de aire y combustible reduciendo el enfriamiento, mejorando la inflamabilidad, y la soldadura continua por láser y por resistencia reduce la probabilidad de separación de este metal.

Desafortunadamente, el incremento de las propiedades del componente se ven reflejados en un aumento de su valor. Esta tecnología con un precio de USD 135, tiene un costo casi 5 (cinco) veces mayor que el de una bujía estándar. Por lo tanto, en el ensayo se buscará establecer si la implementación de estos nuevos componentes producirá tanto una mejora en el funcionamiento del equipo, como la reducción de gastos de mantenimiento preventivo y correctivo.

El ensayo de las bujías *Bosch 7305* se inició el 29 de noviembre del 2019, con el objetivo de evaluar su comportamiento en el equipo motocompresor N°4 durante un período de tiempo extenso, y bajo las condiciones normales de operación. De esta manera, manteniendo un seguimiento del parámetro de SRN de cada cilindro,

---

se puede conocer el estado presente de los componentes y estimar el tiempo de funcionamiento restante hasta su posible desgaste. El ensayo prosiguió hasta el 30 de Julio del 2020, donde por un error en la coordinación de los mantenimientos preventivos se realizó el reemplazo de todas las bujías de motor. En este periodo de tiempo, los componentes alcanzaron las 5.500 h de funcionamiento sin presentar fallas ni experimentar ninguna detención no programada por desvío de temperatura de cilindro motor. Lo cual se asume como una mejora en el comportamiento debido al nuevo componente utilizado.

Por otro lado, se realizó un seguimiento respecto al comportamiento de los parámetros SRN de cada cilindro, y se comparó con los datos obtenidos durante el ensayo con la referencia del funcionamiento del equipo con las bujías estándar meses antes del comienzo de la prueba. Los resultados obtenidos pueden visualizarse en la Figura 31, la cual presenta la dispersión de los datos de la SRN a lo largo del período de funcionamiento de cada bujía, teniendo en cuenta que ambas fueron reemplazadas de forma preventiva.

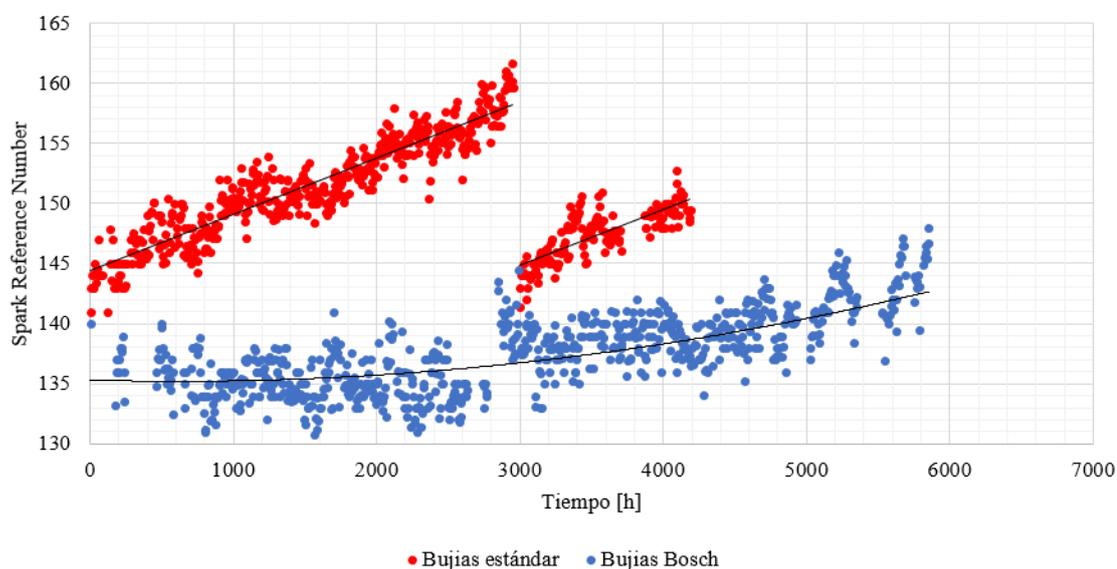


Figura 31. Comparación entre bujías estándar vs Bosch 7305 en MC-N°4

En la figura anterior, se observa como la bujía estándar, además de comenzar con un requerimiento de energía mayor, tiene una pendiente más pronunciada lo que se interpreta como un desgaste más acelerado de los electrodos. También se puede observar cómo alrededor de las 3.000 h la bujía requiere mayor energía y la Unidad

de Control del Motor (ECU) toma la decisión de saltar al nivel 2 (dos) de energía, lo que se percibe como una disminución de la SRN.

En comparación, se aprecia que la bujía *Bosch* tiene una mayor resistencia al desgaste al observar la tendencia uniforme de la curva SRN en función del tiempo. Esto está directamente relacionado con la utilización de electrodos de iridio y las mejoras que se le introdujeron a este elemento. Con las 5.500 h de funcionamiento durante el ensayo, y realizando una proyección polinómica de segundo grado, se puede extrapolar esta curva y suponer que como mínimo esta nueva tecnología funcionará durante 10.000 h antes de que se produzca el salto de energía al segundo nivel.

Finalmente, del ensayo se logra concluir que las bujías *Bosch 7305* proporcionan una mayor *performance* al motor, disminuyendo la cantidad de detenciones no programadas por desvío de temperatura de cilindro motor, y además, tiene una mayor resistencia al desgaste a causa de sus materiales de construcción. Pero en detrimento, su valor de *USD 135* es muy elevado en comparación con las bujías estándares.

Analizados los resultados obtenidos, y contemplando que los resultados son los deseados pero la diferencia de precios entre los componentes es muy grande, se plantea una prueba adicional empleando bujías alternativas con un costo inferior a las propuestas por *Bosch*. Esta decisión se toma considerando que, el objetivo principal del cambio de tecnología es lograr disminuir la cantidad de detenciones no programadas, sin necesidad de incrementar el tiempo de reemplazo de la bujía, ya que el motor necesita obligatoriamente un mantenimiento preventivo a las 3.000 h.

Por lo expuesto, se plantea como alternativa el ensayo de bujías *Denso GI3-3 Iridium Saver*. Estos cuentan con una confiabilidad mayor que las bujías convencionales, gracias a la implementación de un electrodo central de aleación de iridio y un electrodo de masa de aleación de platino, soldados por láser de 360°C. Su precio es de aproximadamente *USD 70*, el cual representa un poco más del doble del valor de las bujías *Champion* actualmente en uso, siendo mucho más accesible que las *Bosch 7305*. De las especificaciones técnicas y las pruebas realizadas por el fabricante, se

---

evidencia un menor requerimiento de voltaje por bujía a lo largo del tiempo, es decir, una mayor resistencia al desgaste, por lo que se constituye en una muy buena opción controlando el costo asociado a las bujías.

### **Válvulas de Compresor**

En base a lo desarrollado en el análisis de fallas, se plantean tres recomendaciones que se deberían ejecutar para conseguir una mejora sustancial en la disminución de las detenciones no programadas por alta temperatura de cilindro compresor:

#### **A. Exceso de sales en el gas que ingresa al compresor**

Del análisis de falla previamente realizado, en base a los datos recopilados de las detenciones no programadas durante todo el 2019, se logró identificar que las detenciones por alta temperatura de cilindro compresor es uno de los problemas más recurrentes en las plantas de compresión. Además, este defecto viene acompañado por una gran cantidad de válvulas del compresor reemplazadas por roturas y fisuras en los platos, debido principalmente al ingreso de sólidos en el compresor.

En la Figura 32, se muestran las partículas sólidas encontradas en el interior de los cilindros del compresor y en la tapa de las válvulas.

En primera instancia, se realizaron inspecciones donde se detectó presencia de arena y otras partículas en cantidades significativas, lo que llevó a interpretar que el separador primario no estaba funcionando correctamente. Sin embargo, al revisar estos equipos no se percibió fallas en el desempeño del mismo.

Por lo tanto, con el objetivo de lograr un entendimiento más detallado del mecanismo de falla, se analizó la información de los componentes principalmente afectados realizando un Diagrama de Pareto discriminando por etapas y posiciones de las válvulas más afectadas. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 33, observando que las válvulas de descarga son los componentes más afectados. Siendo que el 45 % de las fallas se producen en la primera etapa del cilindro N°1 en el CE y un 25 % en la primera etapa del cilindro N°3 también del CE. Luego, en las etapas siguientes, se contempla una disminución de la rotura de las válvulas.

---



Figura 32. Partículas sólidas encontradas en el interior de los cilindros del compresor.

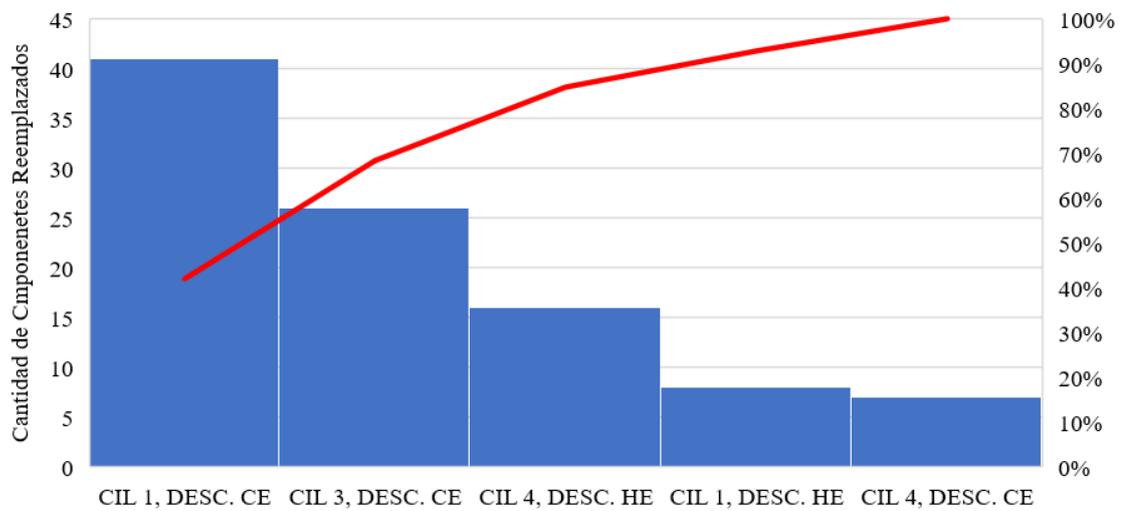


Figura 33. Diagrama de Pareto de reemplazo de válvulas.



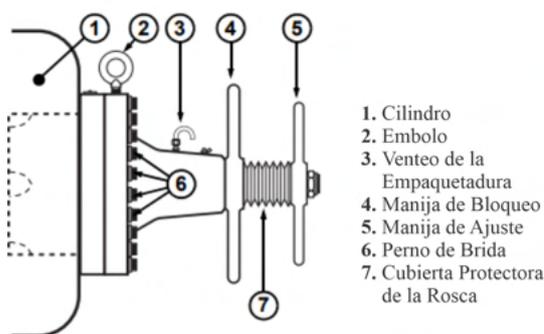


Figura 35. Pocket de volumen muerto (Ariel, 2011)

gran parte del líquido y la sublimación de las sales disueltas que se encuentran en el gas.

- El cilindro más afectado es el cilindro N°1, el cual tiene el mayor porcentaje de reemplazos de válvulas de descarga del compresor según el análisis realizado. Parte de la causa de la localización del problema es la tubería interna del recipiente a presión, que descarga directamente sobre este cilindro. Esto provoca una mayor probabilidad de ingreso de las partículas sólidas.
- Por último, las válvulas de descarga más afectadas se encuentran en el lado del cigüeñal de cilindro compresor. Esto se contrasta con que estas cámaras de compresión son las que trabajan en condiciones mas exigentes, debido a la utilización del dispositivo conocido como *Pocket* de volumen muerto variable.

Además, para exhibir la recurrencia de este problema, y las consecuencias económicas para el sector de mantenimiento, se analizaron los costos de las intervenciones de la cuadrilla de mantenimiento y los costos de la reparación y compra de nuevas válvulas. De este análisis se llega a los valores indicados en la Tabla 7:

En la Tabla 7 se discriminan los costos asociados a los materiales, desde enero hasta octubre del 2020, período en el que se reemplazaron 403 válvulas de compresor, siendo que aproximadamente el 70 % fueron reparadas y el 30 % reemplazadas por componentes nuevos. A esto, se le agrega un total de USD 26.784 de costos de servicio, generándose un costo para la empresa de USD 214.168 por esta falla.

Tabla 7. Costos materiales de las intervenciones y reemplazos de válvulas ocasionados por sales en el gas.

<b>Válvulas reemplazadas nuevas y reparadas 2020</b>		
<b>Posición de las válvulas</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costos materiales [USD]</b>
Válvula 1° Etapa Descarga	264	134.663
Válvula 1° Etapa Succión	18	14.660
Válvula 2° Etapa Descarga	83	30.446
Válvula 2° Etapa Succión	7	1.621
Válvula 3° Etapa Descarga	18	1.800
Válvula 3° Etapa Succión	13	4.194
<b>TOTAL</b>	<b>403</b>	<b>187.384</b>

Toda esta información fue brindada al sector de producción, los cuales son los encargados de investigar la mejor solución para reducir las sales del gas que ingresa al compresor.

De esta forma, en inicios de diciembre de 2020 se procedió a realizar una intervención de carácter químico en el separador primario que ayuda a decantar las sales del gas en este equipo y disminuir su ingreso al compresor. Este método fue empleado en otras ocasiones, pero para aplicaciones diferentes. Complementariamente, se debe mencionar que no se reemplazaron todas las válvulas ni se limpiaron los interiores de los compresores, para realizar una puesta a cero del sistema.

Al momento de culminar el presente trabajo en la Empresa, este método llevaba cuatro meses desde su implementación. En la Figura 36 se observa una leve mejora y disminución del reemplazo de las válvulas de compresor de la primera etapa. Por lo tanto, se considera de fundamental interés continuar con el seguimiento de las detenciones no programadas por alta temperatura de cilindro compresor y con el reemplazo de válvulas que se vaya efectuando.

En este sentido, se analizarán las nuevas válvulas que fueron cambiadas luego de la introducción del químico, de forma tal de recopilar datos completos o censurados para realizar un nuevo LDA.

## **B. Establecer un procedimiento de medición de gas**

Como sugerencia para el sector de producción, se recomienda establecer un procedimiento de medición del gas a la salida del separador primario, de modo que,

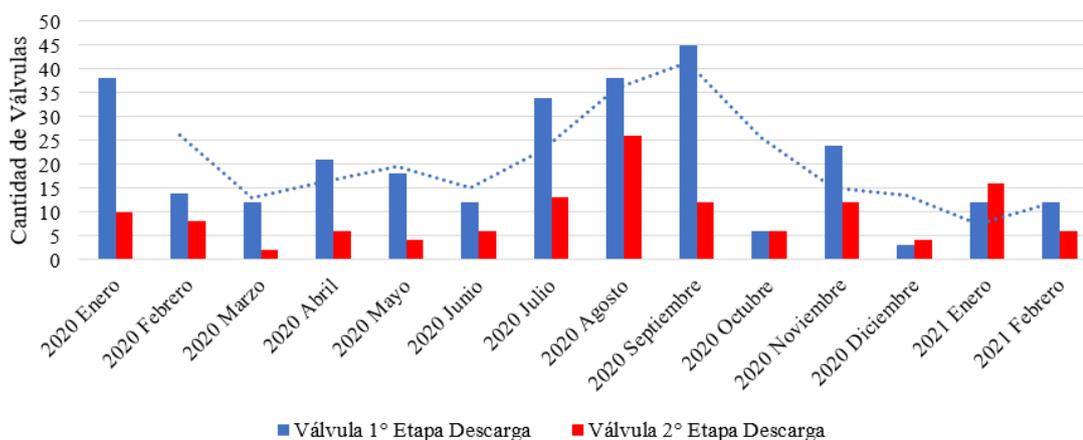


Figura 36. Estadísticas de reemplazo de válvulas de compresor

mediante inspecciones semanales o mensuales, se conozcan la variación de la composición del gas en el tiempo. Con esta información se puede:

- Corroborar si el método aplicado está brindando el resultado deseado para disminuir la proporción de sales en el gas.
- Relacionar el aumento de las partículas sólidas con la apertura de distintos pozos o el aumento de la producción.
- Predecir próximas detenciones por este mecanismo de falla, y realizar limpiezas de filtros de succión, cilindros compresor, recipientes de succión y descarga de cada etapa, y evitar roturas de los componentes internos de las válvulas de compresor.

### C. Verificar que tipo de inspecciones realizan los operadores

Por último, los operarios de los equipos tienen una rutina de inspección diaria y semanal, en donde verifican el estado de los distintos componentes de la planta y miden algunos parámetros manualmente. Entre estas actividades se encuentra la inspección de los filtros de succión de los motocompresores, la cual es fundamental para conocer el estado del gas que está ingresando al compresor.

Lamentablemente, cuando la cuadrilla de mantenimiento asistía a la planta, debido a la detención no programada por alta temperatura de cilindro motor, y se requería el cambio de las válvulas de compresor por ingreso de sólido, se advertía que los filtros de succión habían perdido su funcionalidad previamente.

Por ende, la falta de revisión por parte de los operarios y de la atención correspondiente de supervisores directos, impedían conocer el estado de los filtros de succión, y de esta forma actuar de forma preventiva para evitar la rotura de las válvulas del interior del compresor.

Por lo expuesto, se recomiendan las siguientes acciones:

- Concientizar a los operarios sobre las razones por las cuales se realizan las inspecciones y las consecuencias de su carencia.
- Adecuar la frecuencia de las inspecciones e instrumentar un registro apto para el propósito. Ajustar el mecanismo de supervisión.
- Solicitar que los supervisores efectúen un seguimiento más detallado de lo inspecciones que realiza el personal a su cargo.
- Mejorar la eficiencia del sistema de atenuación de ingreso de sólidos a los compresores.

#### **4.4. Líneas futuras de trabajo**

El trabajo desarrollado se hizo hincapié las detenciones no programadas con mayor frecuencia que afectan a la operación de los equipos, y describió una serie de acciones de mejora que tienen mayor probabilidad de alcanzar un resultado beneficioso utilizando la menor cantidad de recursos económicos, logísticos y humanos. Independientemente de las propuesta realizada, a futuro y a nivel complementario, se considera conveniente explorar la posibilidad de:

- Implementar la taxonomía de equipo, el análisis de modos y causas de falla según la norma ISO 14224 (ISO, 2016), con el objetivo de establecer un convenio común en todos los sectores de la empresa, para la descripción de las fallas y efectos que afectan a los equipos, y de esta forma, recolectar una cantidad significativa de datos para realizar análisis de mayor complejidad.
  - Ensayar las bujías *DENSO GI3-3 Iridium Saver*.
  - De persistir el ingreso de sólidos al compresor, se recomienda realizar una investigación combinando las detenciones recopiladas con los datos de producción. Esta
-

sería una opción para comprender y determinar si la abundancia de sales en el gas está relacionada con la operación de los equipos, o con la apertura o cierre de determinados pozos de extracción.

## 5. CONCLUSIONES

El presente proyecto se desarrolló de forma satisfactoria en relación a los objetivos planteados. El Análisis de Falla permitió identificar las principales causas un número importante de detenciones no programadas en los equipos motocompresores de gas. Además, proporcionó las causas raíz en las cuales se centraron las acciones de mejora propuestas para que los distintos sectores de la empresa puedan establecer acciones tendientes a mitigar estas fallas.

Complementariamente, el Análisis de Datos de Vida, enfocado en las bujías de ignición del motor y las válvulas del compresor, proporcionó conocimientos esenciales acerca de la confiabilidad y la tasa de falla, que junto con los costos de mantenimiento correctivo y preventivo, permitieron establecer los tiempos óptimos de funcionamiento de cada uno. De esta forma, se consiguió verificar que las acciones preventivas se realizaron en el tiempo correspondiente.

Este trabajo fue muy enriquecedor desde el punto de vista académico, constituyéndose en una muy alentadora primera experiencia profesional. Durante el período de servicio en la Empresa, son numerosos los conocimientos adquiridos relacionados especialmente a tareas como: implementación de herramientas e instrumentos probabilísticos utilizados en mantenimiento, utilización de *software* de planificación de recursos empresariales y de mantenimiento, participación en los análisis de falla de los equipos de compresión, el seguimiento y la notificación de los desvíos en las tendencias de los parámetros de los motocompresores, entre otras. Por lo expuesto, las actividades desarrolladas permitieron una ampliación y consolidación de los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera.

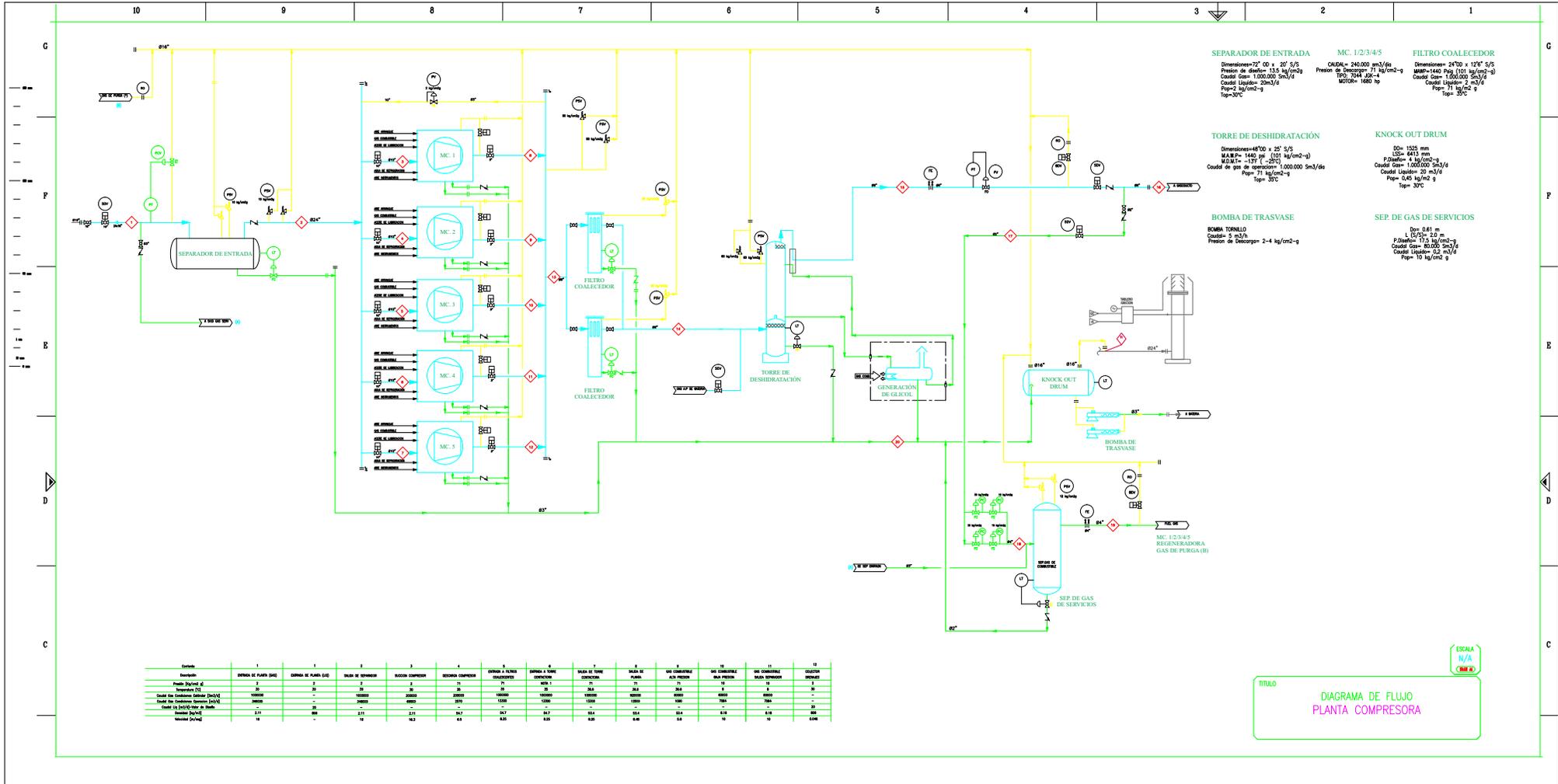
---

## 6. REFERENCIAS

- Arata, A. & Kristjanpoller, F. (2013). *Ingeniería de mantención*.
- Ariel. (2011). *Maintenance and Repair Manual For JGH:E:K:T Heavy Duty Balanced Opposed Compressors*. Ariel Corporation.
- Ariel. (2018). *Part list*. Ariel Corporation.
- Bosch. (2019). *Bosch Industrial Spark Plugs: Engineered to Perform*.
- Bugna, L. (2020). *Curso de capacitación para la operación y mantenimiento de moto-compresores*.
- Castaño, S. (2014). *Análisis de datos de falla*.
- Champion. (2014). *Análisis de las Bujías-Diagnóstico de Problemas*.
- Denso. (2015). *DENSO industrial Gas Plugs: The Iridium Saber Spark Plug Solution For Your Industrial Engine Needs*.
- Devore, J. L. (2008). *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*.
- Escobar, L., Villa, E. & Yáñez, S. (2003). *Confiabilidad: Historia, estado del arte y desafíos futuros*.
- GEC Co. (2014). *Waukesha gas engines: VHP Series Four 12-Cylinder with AFR2/emPact Emissions Control System parts catalog*. General Electric Co.
- GEC Co. (2017). *Waukesha gas engines: VHP Series Four 12-Cylinder with ESM2 operation maintenance*. General Electric Co.
- González Sosa1, J. V., Loyo Quijada, J., López Ontiveros, M. A., Pérez Montoya, P. & Cruz Hernández, A. (2018). *Mantenimiento Industrial en Máquinas Herramientas por Medio de AMFE*.
- Ishikawa, K. (1989). *Introducción al control de calidad*. Díaz de Santos.
- ISO. (2016). *International Organization for Standardization, ISO 14224: Petroleum, petrochemical and natural gas industries-Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment*. Internacional Organization for Standardization.
- Mora, L. (2009). *Mantenimiento - planeación, ejecución y control*. Alfaomega Grupo Editor.

- Moreno, R., Rodriguez, E., Lopez Cruz, I. & Aguilar, A. (2017). *Confiabilidad y Análisis de Fallas utilizando la Distribución Weibull*. 6° Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas.
- Moubray, J. (1997). *RCM II Reliability-Centred Maintenance*. Industrial Press Inc.
- NBR. (1994). *Confiabilidade e Manutenibilidade*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Pistarelli, A. (2010). *Manual de Mantenimiento, Ingeniería, Gestión y Organización*. Buenos Aires.
- Rebollo Altamira, M. (2017). *Ingeniería de la confiabilidad. Antecedentes, ciclo de vida y costos*.
- Spano, C. (2011). *Confiabilidad de la gestión estratégica*. Revista mantención.
- Torres, L. (2015). *Gestión Integral de Activos Físicos y Mantenimiento*. Alfaomega Grupo Editor.
- Vishnu, C. R. & Regikumar, V. (2016). Reliability Based Maintenance Strategy Selection in Process Plants: A Case Study. *Procedia Technology*, 25, 1080-1087.
-

**A. Anexo I: Diagrama de flujo planta compresora**



Compo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Descripción	SEPARADOR DE PLUGAS (A)	SEPARADOR DE PLUGAS (B)	SEPARADOR DE PLUGAS (C)	BLOQUE COMPRESOR	SEPARADOR COMPRESOR	SEPARADOR A FILTRO COALECEDOR	SEPARADOR A TORRE DE DESHIDRATACIÓN	SEPARADOR DE PLUGAS				
Presión (kg/cm2 g)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Temperatura (°C)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Caudal Gas Comprimido (Sm3/d)	1000000	-	1000000	20000	20000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
Caudal Gas Comprimido (Sm3/h)	41666	-	41666	833	833	41666	41666	41666	41666	41666	41666	41666
Caudal de Líquido (m3/d)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Temperatura (°C)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Temperatura (°C)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Temperatura (°C)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20

ESCALA  
 N/A  
 (B) (C)

TITULO  
 DIAGRAMA DE FLUJO  
 PLANTA COMPRESORA

**B. Anexo II: Análisis Causa Raíz**

### Método de los 5 Porqués

Con el objetivo de obtener las causas reales que producen el problema, se plantea la estrategia de los 5 Porqués partiendo de cinco ramas principales (Mano de obra, Maquinaria, Medida, Materiales y Método) para categorizar los factores involucrados.

Efecto	Ramas principales	5 Porqués										Causa final
		Possible causa	Por que?	Possible causa	Por que?	Possible causa	Por que?	Possible causa	Por que?	Possible causa	Por que?	
Exceso de detenciones no programadas por desvío de temperatura del cilindro motor	Mano de obra/Personal	El personal de mantenimiento en primera instancia reemplaza la bujía del cilindro afectado cuando ocurre una detención por desvío de temperatura del cilindro motor	→	Se busca solucionar el problema de forma inmediata y colocar el equipo en marcha, pero a la larga, terminan sin solucionar el problema	→	Las bujías no eran la causa raíz del problema	→	No se revisan los demás parámetros del motor	→	Falta de registro de mantenimiento correctivo para estas detenciones		Falta de registro de mantenimiento correctivo para estas detenciones
									Falta de capacitación de las cuadrillas y los supervisores de mantenimiento	Falta de capacitación de las cuadrillas y los supervisores de mantenimiento		
									Falta de personal en las cuadrillas y supervisores de mantenimiento	Falta de personal en las cuadrillas y supervisores de mantenimiento		
	Maquinaria/Herramientas	No se conocen todas las causas de falla y no se puede localizar el problema principal	→	Falta de información detallada de las condiciones de los componentes cambiados	→	La cuadrilla de mantenimiento no detalla las condiciones de los componentes reemplazados	→	Falta de procedimiento para la descripción de estado del componente y motivos de reemplazo		Falta de procedimiento para la descripción de estado del componente y motivos de reemplazo	Falta de procedimiento para la descripción de estado del componente y motivos de reemplazo	
						No se tienen los instrumentos adecuados para establecer el modo de falla del equipo		Imperfecta gestión en la reposición de los instrumentos por parte de la empresa subcontratada		Imperfecta gestión en la reposición de los instrumentos por parte de la empresa subcontratada		
	Método/Proceso	Las bujías no sean las adecuadas para la condición de funcionamiento del motocompresor	→	Se utilizan bujías estándar								Se utilizan bujías estándar
	El mantenimiento no sea el adecuado	→	Se cambian las bujías antes de que su vida útil termine	→	No se verifican los parámetros de desgaste de las bujías	→	Los supervisores y las cuadrillas de mantenimiento no conocen su existencia	→	Falta de capacitación de las cuadrillas y los supervisores de mantenimiento		Falta de capacitación de las cuadrillas y los supervisores de mantenimiento	
									Falta de registro de mantenimiento correctivo para estas detenciones		Falta de registro de mantenimiento correctivo para estas detenciones	
									Falta de personal en supervisión		Falta de personal en supervisión	
	El mantenimiento preventivo no es el adecuado	→	El cambio de aceite gobierna los tiempos del mantenimiento preventivo								El cambio de aceite gobierna los tiempos del mantenimiento preventivo	
Medida	La calidad de la información recopilada no es la adecuada	→	No se conocen todas las causas de falla y no se puede localizar el problema principal	→	Falta de información detallada de las condiciones de los componentes cambiados	→	La cuadrilla de mantenimiento no detalla las condiciones de los componentes reemplazados	→	Falta de procedimiento para la descripción de estado del componente y motivos de reemplazo		Falta de procedimiento para la descripción de estado del componente y motivos de reemplazo	
Materiales	Falta de consumibles a la hora de realizar un mantenimiento preventivo	→	Falta de stock de bujías	→	Se reemplazan más repuestos por mes de lo esperado	→	Falta de registro de mantenimiento correctivo para estas detenciones		Falta de registro de mantenimiento correctivo para estas detenciones		Falta de registro de mantenimiento correctivo para estas detenciones	
					No se cumplen los requisitos de stock mínimo para la recompra del repuesto	→	Imperfecta gestión del sector de compras		Imperfecta gestión del sector de compras			

**C. Anexo III: Tratamiento detenciones no programadas**

---

